



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLE A PARTIR DE LA PIRÓLISIS  
TÉRMICA DE POLIESTIRENO RECICLADO**

**Trabajo de Titulación**

**Tipo: Proyecto Técnico**

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO QUÍMICO**

**AUTOR: NELSON ROBERTO NUÑEZ FLORES**

**DIRECTOR: ING. PAÚL GUSTAVO PALMAY PAREDES**

Riobamba – Ecuador

2019

**©2019, Nelson Roberto Núñez Flores**

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.

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

Los miembros del Trabajo de Titulación certifican que, el trabajo de investigación titulado **“Obtención de combustible a partir de la pirólisis térmica de poliestireno reciclado”** a responsabilidad del Señor Nelson Roberto Núñez Flores con número de CI: 180462305-4, ha sido minuciosamente revisado por los miembros del tribunal del Trabajo de Titulación, quedando autorizada su presentación.

NOMBRE

FIRMA

FECHA

Ing. Paúl Gustavo Palmay Paredes

2019-07-11

**DIRECTOR DEL  
TRABAJO DE TITULACIÓN**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Ing. Rosa Elena Pinos Neira

2019-07-11

**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Yo, Nelson Roberto Núñez Flores soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el presente Trabajo de Titulación y el patrimonio intelectual de la Memoria de Grado pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

Nelson Roberto Núñez Flores

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo se lo dedico a Dios por darme la oportunidad de alcanzar a formarme como profesional. A mi madre Elena Flores quien por sus enseñanzas, consejos me ayudado a ser una persona de bien con grandes virtudes y a no desmayar en los momentos difíciles. A mi padre Ruperto Núñez por siempre estar ahí apoyándome en todo lo necesario para alcanzar mis metas. A mi familia en general por ser mis guías para seguir avanzando cada día más y llegar hasta donde estoy. Esto es por todos ustedes.

**Nelson N.**

## AGRADECIMIENTO

A DIOS por las bendiciones de todos los días, los momentos de felicidad y los momentos de tristeza, gracias PADRE por todo. A mis padres Ruperto Núñez y Elena Flores por su vida de sacrificios para que yo pueda llegar a este momento tan importante de mi vida.

A todos mis maestros a lo largo de mi formación universitaria en especial al Ingeniero Paúl Palmay y la Ingeniera Rosa Pinos por brindarme toda su ayuda, apoyo, guía, consejos y paciencia hacia mi persona.

Agradezco al laboratorio del Centro de Servicios Técnicos y Transferencia Tecnológica Ambiental CESTTA-ESPOCH, al Dr. Roberto Erazo, Dra. Nancy Veloz, Ing. Marcela Erazo por sus aportes al presente trabajo.

Al personal técnico y su director del Terminal de productos limpios Riobamba Ing. Freddy Obando e Ing. Wilson Granizo, quienes me permitieron utilizar el laboratorio de Control de Calidad para la caracterización físico-química del combustible. Así también a PETROECUADOR Esmeraldas, al Ingeniero Edgar Campoverde quien facilitó el uso del laboratorio de Control de la Calidad.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
CAPITULO I.....	1
1. DIAGNÓSTICO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	1
1.1. Identificación Del Problema.....	1
1.2. Justificación .....	3
1.3. Línea base del proyecto .....	4
1.3.1 Antecedentes de la Empresa .....	4
1.3.2 Marco Conceptual .....	4
1.4. Beneficiarios directos e indirectos .....	29
1.4.1 Beneficiarios Directos .....	29
1.4.2 Beneficiarios Indirectos .....	29
CAPITULO II .....	30
2. OBJETIVOS.....	30
2.1 General.....	30
2.2 Específicos.....	30
CAPITULO III.....	31
3. ESTUDIO TÉCNICO .....	31
3.1. Localización del proyecto. ....	31
3.2. Ingeniería del proyecto. ....	33
3.2.1 Tipo de estudio .....	33
3.2.2 Métodos y Técnicas .....	33
3.2.3 Selección de la materia prima. ....	38
3.2.4 Procedimiento a nivel del laboratorio .....	38
3.2.5 Variables del proceso .....	39
3.3. Proceso de producción.....	40
3.3.1. Materia prima .....	41
3.3.2. Diagrama del Proceso .....	42
3.4. Análisis de Materia prima .....	44
3.5. Valoración de la pirólisis a diferentes temperaturas .....	48
3.5.1. Efecto de la temperatura con un tiempo de residencia de 5 minutos en la obtención de fracción líquida .....	48

3.5.2.	Efectos de la temperatura y presión a distintas temperaturas con un tiempo de residencia de 10 minutos al llegar a la temperatura requerida .....	50
<b>3.6.</b>	<b>Cálculos de Ingeniería</b> .....	<b>51</b>
<b>3.7.</b>	<b>Resultados químicos de los componentes que contienen los productos líquidos obtenidos</b> .....	<b>54</b>
	<i>Hidrocarburos totales de la fracción líquida a 5min</i> .....	54
	<i>Hidrocarburos totales de la fracción líquida a 10min</i> .....	54
<b>3.8.</b>	<b>Comparación de los hidrocarburos presentes en la fracción líquida</b> .....	<b>55</b>
<b>3.9.</b>	<b>Análisis estadístico para determinar la temperatura óptima y tiempo de residencia</b> .....	<b>56</b>
<b>3.10.</b>	<b>Resultados de las propiedades físico-químicas de la fracción líquida obtenida de la pirólisis en el ensayo más óptimo</b> .....	<b>56</b>
<b>3.11.</b>	<b>Resultados de espectroscopia infrarroja de los residuos de la pirólisis</b> .....	<b>57</b>
3.11.1	Espectro IR de los residuos sólidos de la pirólisis a 5min .....	57
➤	<i>Temperatura a 375 °C</i> .....	57
➤	<i>Temperatura a 400 °C</i> .....	58
➤	<i>Temperatura a 425 °C</i> .....	58
➤	<i>Temperatura a 450 °C</i> .....	59
3.11.2	Espectro IR de los residuos sólidos de la pirólisis a 10min .....	59
➤	<i>Temperatura a 375 °C</i> .....	59
➤	<i>Temperatura a 400 °C</i> .....	60
➤	<i>Temperatura a 425 °C</i> .....	60
➤	<i>Temperatura a 450 °C</i> .....	61
<b>3.12.</b>	<b>Requerimientos de tecnología, equipos y maquinaria.</b> .....	<b>61</b>
<b>3.13.</b>	<b>Análisis del costo/beneficio del proyecto.</b> .....	<b>63</b>
<b>3.13.1</b>	<b>Análisis de costo de la materia prima e insumos</b> .....	<b>63</b>
<b>3.13.2</b>	<b>Análisis de costos de equipos e instrumentos de laboratorio</b> .....	<b>63</b>
<b>3.14.</b>	<b>Cronograma de ejecución del proyecto</b> .....	<b>64</b>
	<b>ANALISIS DE RESULTADOS</b> .....	<b>65</b>
	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>70</b>
	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>72</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
	<b>ANEXOS</b>	



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-1:</b> Poder calorífico de diferentes materiales .....	8
<b>Tabla 2-1:</b> Ventajas y desventajas del reciclaje de plásticos .....	8
<b>Tabla 3-1:</b> Clasificación de los plásticos de reciclaje según SPI .....	11
<b>Tabla 4-1:</b> Características físico químicas de ciertos catalizadores .....	21
<b>Tabla 5-1:</b> Ecuaciones cinéticas para polímeros .....	23
<b>Tabla 1-3:</b> Localización geográfica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborzo .....	32
<b>Tabla 2-3:</b> Técnicas para el análisis físico químico del producto final .....	35
<b>Tabla 3-3:</b> Análisis experimental para determinar la temperatura óptima del proceso .....	49
<b>Tabla 4-3:</b> Tabla de promedio de % líquido, sólido y gas obtenido a diferentes temperaturas en un tiempo de residencia de 5 minutos .....	49
<b>Tabla 5-3:</b> Tabla con los promedios de % de líquido, sólido y gas obtenido a diferentes temperaturas en un tiempo de residencia de 10 minutos.....	50
<b>Tabla 6-3:</b> Temperatura de destilación experimental.....	51
<b>Tabla 7-3:</b> Temperatura de destilación corregida.....	52
<b>Tabla 8-3:</b> Tabla de hidrocarburos de la fracción líquida obtenida a diferentes temperaturas en un tiempo de residencia de 5 min.....	54
<b>Tabla 9-3:</b> Tabla de hidrocarburos de la fracción líquida obtenida a diferentes temperaturas en un tiempo de residencia de 10 min.....	54
<b>Tabla 10-3:</b> Resultados de los análisis físico-químicos .....	57
<b>Tabla 11-3:</b> Características y descripción de los equipos .....	61
<b>Tabla 12-3:</b> Costos de materia prima, insumos y otros componentes para obtención de combustible a partir de la pirólisis térmica de poliestireno reciclado .....	63
<b>Tabla 13-3:</b> Costos de producción para la obtención de combustible a partir de la pirólisis térmica de poliestireno reciclado .....	63
<b>Tabla 14-3:</b> Costos de materiales para el control de calidad .....	63
<b>Tabla 15-3:</b> Resultados de las fracciones líquidas, sólidas y gaseosas obtenidas de la pirólisis a diferentes temperaturas en un tiempo de residencia de 5 minutos .....	65
<b>Tabla 16-3:</b> Resultados de las fracciones líquidas, sólidas y gaseosas obtenidas de la pirólisis a diferentes temperaturas en un tiempo de residencia de 10 minutos .....	65
<b>Tabla 17-3:</b> Resultados de los hidrocarburos presentes en la fracción líquida de las diferentes pruebas .....	66
<b>Tabla 18-3:</b> Resultados de los hidrocarburos presentes en la fracción líquida a 425°C .....	66
<b>Tabla 19-3:</b> Comparación de las propiedades físico-químicas del combustible obtenido con	

combustibles comerciales..... 67

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1:</b> Esquema de la molécula de PS .....	15
<b>Figura 2-1:</b> Esquema de la molécula de PS .....	15
<b>Figura 3-1:</b> Diagrama esquemático del proceso de obtención del PS mediante polimerización por suspensión .....	16
<b>Figura 4-1:</b> Diagrama de flujo del proceso para residuos de plásticos en recuperación de hidrocarburos .....	28
<b>Figura 1-3:</b> Mapa del Cantón Riobamba.....	31
<b>Figura 2-3:</b> Localización geográfica del laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias – ESPOCH.....	33
<b>Figura 3-3:</b> Análisis de humedad de la muestra de poliestireno .....	44
<b>Figura 4-3:</b> Análisis TGA de la materia prima (PS) .....	46
<b>Figura 5-3:</b> Prueba de agua de la materia prima (PS) .....	47
<b>Figura 6-3:</b> Prueba de alambre de cobre de la materia prima (PS) .....	47
<b>Figura 7-3:</b> Prueba de acetona de la materia prima (PS) .....	48

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-3:</b> Diagrama de proceso para la obtención combustible a partir de la pirólisis térmica de PS .....	43
<b>Gráfico 2-3:</b> Análisis FTIR de la materia prima (PS) .....	45
<b>Gráfico 3-3:</b> Porcentaje vs temperatura de las fracciones obtenidas en el proceso de pirólisis en un tiempo de residencia de 5min.....	50
<b>Gráfico 4-3:</b> Porcentaje vs temperatura de las fracciones obtenidas en el proceso de pirólisis en un tiempo de residencia de 10min.....	50
<b>Gráfico 5-3:</b> Curva de destilación ASTM.....	53
<b>Gráfico 6-3:</b> Diagrama % vs hidrocarburos presentes en la fracción líquida obtenida de la pirólisis térmica de poliestireno 5min.....	55
<b>Gráfico 7-3:</b> Diagrama % vs hidrocarburos presentes en la fracción líquida obtenida de la pirólisis térmica de poliestireno a 10min .....	55
<b>Gráfico 8-3:</b> Análisis FTIR de la fracción solida obtenida de la pirólisis térmica a 375 <sup>0</sup> C a 5min .....	57
<b>Gráfico 9-3:</b> Análisis FTIR de la fracción solida obtenida de la pirólisis térmica a 400 <sup>0</sup> C a 5min .....	58
<b>Gráfico 10-3:</b> Análisis FTIR de la fracción solida obtenida de la pirólisis térmica a 425 <sup>0</sup> C a 5min .....	58
<b>Gráfico 11-3:</b> Análisis FTIR de la fracción solida obtenida de la pirólisis térmica a 450 <sup>0</sup> C a 5min .....	59
<b>Gráfico 12-3:</b> Análisis FTIR de la fracción solida obtenida de la pirólisis térmica a 375 <sup>0</sup> C a 10min .....	59
<b>Gráfico 13-3:</b> Análisis FTIR de la fracción solida obtenida de la pirólisis térmica a 400 <sup>0</sup> C a 10min .....	60
<b>Gráfico 14-3:</b> Análisis FTIR de la fracción solida obtenida de la pirólisis térmica a 425 <sup>0</sup> C a 10min .....	60
<b>Gráfico 15-3:</b> Análisis FTIR de la fracción solida obtenida de la pirólisis térmica a 450 <sup>0</sup> C a 10min .....	61
<b>Gráfico 16-3:</b> Cromatograma de la fracción líquida obtenida a 425 <sup>0</sup> C .....	68

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

- ANEXO A.** Norma Técnica Ecuatoriana para productos derivados del petróleo. Diésel
- ANEXO B.** Norma Técnica Ecuatoriana para productos derivados del petróleo. Diésel Premium
- ANEXO C.** Norma Técnica Ecuatoriana para productos derivados del petróleo. Diésel No.1
- ANEXO D.** Norma Técnica Ecuatoriana para productos derivados del petróleo. Diésel No.2
- ANEXO E.** Resultado de los análisis físicos químicos de la fracción líquida
- ANEXO F.** Análisis químicos de la fracción líquida obtenida a 425<sup>0</sup>C a 5min
- ANEXO G.** Análisis estadístico
- ANEXO H.** Proceso de obtención de combustible por pirólisis térmica
- ANEXO I.** Pruebas físico-químicas del combustible líquido
- ANEXO J.** Tabla con los factores de corrección para determinar la temperatura de destilación

## RESUMEN

El objetivo fue determinar el efecto de la temperatura y el tiempo de reacción óptimo para obtener combustible con propiedades similares a la del diésel comercial a partir de un proceso de pirólisis térmica de poliestireno. Los residuos plásticos de tipo PS se utilizaron como materia prima en un reactor de pirólisis tipo batch a pequeña escala. Para ello se realizó diferentes ensayos a nivel de laboratorio en el reactor con el fin de obtener un combustible con propiedades similares al combustible comercial. A 425°C el rendimiento de gas fue de 18,63% en masa, el rendimiento del carbón fue de 2,2824% en masa, mientras que el rendimiento de la fracción líquida fue de 79,0833% en masa. El aumento de la temperatura a más de 425°C no produjo un cambio significativo en los porcentajes de las diferentes fracciones obtenidas y el tiempo no fue considerado como una variable que influya en su obtención. La temperatura y tiempo de reacción óptimos se encontraron en 425°C y 10min a pesar de no ser el tiempo una variable influyente. La fracción líquida obtenida en condiciones óptimas presentaba un grado API de 19,8, una densidad de 0,9352, una viscosidad cinemática de 1,026 cSt, un contenido de azufre de 112ppm, un punto de inflamación de 30°C, un contenido de agua y sedimento de 0,5%v, una temperatura de destilación del 90% de 325°C. Con esto resultados se establece que la obtención de combustible a partir de la pirólisis térmica de poliestireno es factible, obteniéndose así un producto como fuente alternativa para generar energía a partir de residuos generados a nivel mundial; sin embargo, se recomienda realizar el estudio a partir de diferentes materias, controlando otras variables para obtener un producto de mayor calidad y rendimiento superior al obtenido.

**Palabras Claves:** <INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA QUÍMICA>, <PROCESOS INDUSTRIALES>, <PIRÓLISIS TÉRMICA > <REACTOR DE PIRÓLISIS> <TEMPERATURA> <PRESIÓN> <POLIESTIRENO> <ESPECTROSCOPIA INFRARROJA (IR)> <ANÁLISIS TGA>

## ABSTRACT

The objective was to determine the effect of the temperature and the optimal reaction time to obtain fuel with properties similar to that of commercial diesel from a thermal pyrolysis process of polystyrene. The PS-type plastic waste was used as a raw material in a small-scale batch pyrolysis reactor. For this, different tests were carried out at the laboratory level in the reactor in order to obtain a fuel with properties similar to commercial fuel. At 425 ° C the gas yield was 18.63% by mass, the coal yield was 2.2824% by mass, while the yield of the liquid fraction was 79.0833% by mass. The increase of the temperature to more than 425 ° C did not produce a significant change in the percentages of the different fractions obtained and the time was not considered as a variable that influences its obtaining. The optimal temperature and reaction time were found at 425 ° C and 10 min despite not being time an influential variable. The liquid fraction obtained under optimum conditions had an API grade of 19.8, a density of 0.9352, a kinematic viscosity of 1.026 cSt, a sulfur content of 112ppm, a flash point of 30 ° C, a water content and sediment of 0.5% v, a 90% distillation temperature of 325 ° C. With this results it is established that the obtaining of fuel from the thermal pyrolysis of polystyrene is feasible, thus obtaining a product as an alternative source to generate energy from waste generated worldwide; However, it is recommended to conduct the study from different materials, controlling other variables to obtain a product of higher quality and higher yield than the one obtained.

**Key Words:** <CHEMICAL ENGINEERING AND TECHNOLOGY>, <INDUSTRIAL PROCESSES>, <THERMAL PYROLYSIS> <PIROLYSIS REACTOR> <TEMPERATURE> <PRESSURE> <POLYSTYRENE> <INFRARED SPECTROSCOPY (IR)> <TGA ANALYSIS>

# CAPITULO I

## 1. DIAGNÓSTICO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

### 1.1. Identificación Del Problema

Según la Asociación de Plásticos de Europa a diario en el mundo se genera alrededor de 4 millones de toneladas de residuos plásticos, factor que es importante no solo por la cantidad de residuos que significa, sino también por el volumen o espacio para el almacenamiento que bordea los 20 millones de metros cúbicos en rellenos o basureros para su disposición final.

Dentro de esta problemática, se tiene la generación de residuos alrededor de 1500 millones de toneladas y, el espacio físico para disponer estos residuos plásticos ascendería a 7300 millones de metros cúbicos (PlasticsEurope, 2015, p.1-34).

Por lo que la generación y consumo de plásticos toma mucha importancia debido a que la utilización de materiales tradicionales como son los distintos tipos de maderas, metales, etc., ha sido mermada y sustituidos por la variedad de plásticos los cuales tiene un rol protagónico, por su adaptabilidad a los entornos productivos y satisfacción de las diferentes necesidades, por esto la producción de plásticos en el mundo se incrementara progresivamente siendo utilizados en la mayoría de industrias como la alimenticia para almacenar y transportar productos envasados, líquidos, etc., en la industria farmacéutica para el almacenamiento y transporte de medicamentos, en la construcción, el plástico más utilizado es el PVC; en transporte, en la fabricación de vehículos, en la agricultura, etc.

Según datos publicados por la BBC, desde su invención en 1907, se ha producido 8,300 millones de toneladas métricas de plástico no reciclado, de estos plásticos tan solo el 9% has sido reciclado y un 12% incinerado mientras que el plástico restante se ha acumulado en vertederos o en el ambiente.

Además, el tiempo de vida de los plásticos es un punto negativo ya que toma alrededor de 180 años en degradarse, siendo el medio marino el más afectado por este tipo de desechos. Otro factor importante es su peso, al ser más ligero que otros materiales, su costo de producción, son muy utilizados juega un papel importante en la elaboración y utilización de éstos plásticos; así se



convirtieron en materiales esenciales dentro de muchas áreas como lo son la alimenticia, farmacéutica, enlatados, salud, hogares, construcción, etc.

Desde el año 1950 en que la producción de plásticos tomo lugar, ésta se ha visto incrementada a gran escala dando lugar a una producción mayor en la última década siendo superior a la del siglo pasado. Las previsiones del futuro no son alentadoras, ya que se estima que para el 2030 la producción de plástico se incremente a 700 millones de toneladas y a 1800 millones para el año 2050. La producción a nivel mundial de plásticos fue de 322 millones de toneladas en el año 2016 con un incremento a 335 millones de toneladas al año siguiente y un aumento del 4,9% en el año 2018 (PlasticsEurope, 2015, p. 8).

En Ecuador para el año 2017 la generación de residuos era de 5,4 millones de toneladas métricas por año, sin embargo, comparado con la región Andina, nuestro país se encuentra antes de Chile, Brasil, Perú y Colombia en lo que se refiere a generación de residuos plásticos.

Así, Ecuador al ser un país que en comparación a otros genera una cantidad de residuos plásticos considerable, pero en una publicación de Información Ambiental de los Hogares del INEC (2016, p 5-19), nos indica que, dentro de los distintos tipos de residuos clasificados, el plástico fue el residuo con mayor aumento, desde 17,46% en el 2010 hasta el 38,15% en el año 2017. Esto se debe a que los residuos plásticos presentan una baja biodegradabilidad y producen un fuerte impacto ambiental, por lo que es necesario establecer estrategias de gestión adecuadas para minimizar sus efectos nocivos al ambiente.

Una forma de combatir la problemática de los plásticos que se ha desarrollado en los últimos 10 años es la pirólisis de los residuos de polietileno, polipropileno, poliestireno, por sus ventajas de reducción y obtención de combustibles, la cual trata de un tipo de reciclaje químico con el cual se logra obtener una mezcla de hidrocarburos semejantes a los combustibles líquidos y gaseosos dependiendo del tipo de plásticos que se utilicen en el proceso.

Los países subdesarrollados dependen mayoritariamente de los rellenos sanitarios dispuestos para la disposición final de los RSU, desperdiciando los valores que aportan los diferentes tipos de reciclaje a la economía de cada país. (Ipiales, P, p.2).

## 1.2. Justificación

Los plásticos se basan en la química del carbono por lo que son materiales orgánicos de gran peso molecular de los cuales su gran mayoría son sintéticos obtenidos a partir del petróleo mientras que los naturales son escasos como la celulosa y el caucho, se encuentran formados por moléculas de gran tamaño llamada macromoléculas las cuales estas formadas por la unión de elementos sencillos conocidos como monómeros asemejando a los eslabones de una cadena, además de poseer la capacidad de moldearse para lograr la forma requerida.

Los plásticos se obtienen a partir de la unión de varios monómeros mediante una reacción conocida como polimerización, esta reacción puede ocurrir por medio de reacciones de adición o condensación de pequeñas moléculas de carbono formando radicales, dando lugar a una reacción en cadena finalizando una vez que el reactivo inicial se convierta en el producto deseado.

Por todo lo que implica la gran cantidad de residuos generados a partir de la generación de estos plásticos y en busca de una solución a este problema medio ambiental se han planteado varias técnicas para el tratamiento de residuos plásticos, entre ellas, el reciclado mecánico del cual se obtienen materias primas secundarias con propiedades físicas y químicas idénticas a las del material original (Espinoza E., 2009, p. 2)., aprovechamiento energético en donde el plástico es usado como combustible debido a su elevado poder calorífico, aquí se pueden aprovechar todo tipo de plásticos incluso aquellos que presentan deterioro o suciedad (Aracil I, 2008), y reciclado químico que incluye despolimerización, gasificación y pirólisis, en donde se descomponen los plásticos usados en componentes más sencillos como son los monómeros de partida, gas de síntesis o hidrocarburos (Espinoza E., 2009, p. 2).

Una solución que se da a esta problemática es la pirólisis térmica en la cual al someter los residuos plásticos a elevadas temperaturas en ausencia de oxígeno en un reactor se produce la ruptura de sus enlaces C-C produciendo fracciones sólidas, líquidas y gaseosas.

La pirólisis es el proceso de descomposición térmica en ausencia de oxígeno, con temperaturas comprendidas entre 400° y 1000°C, obteniéndose una fracción gaseosa, una líquida y una sólida aprovechable (Aracil, I, 2008). Dentro del proceso de pirólisis efectivamente se puede transformar los residuos plásticos de poliestireno (PS) en combustible, dado que en el proceso se obtendrá un mayor porcentaje de fracciones líquidas en comparación con plásticos como el polipropileno en el que el porcentaje de fracciones líquidas obtenidas son menores.

Al aprovechar los residuos plásticos generados para la producción de combustibles, por medio de la pirólisis térmica de materiales plásticos se logra dar una solución a la problemática de

contaminación al ambiente al darle un valor agregado a los diferentes plásticos y así con el producto final líquido, sólido y gas obtenidos utilizarlos como nuevas fuentes de energía.

Por tal motivo dentro de políticas a implementarse a nivel mundial se ha considerado como una de las prioridades el desarrollo sostenible, sustentable y el tratamiento de los residuos plásticos de una manera eficiente y óptima.

### **1.3. Línea base del proyecto**

#### ***1.3.1 Antecedentes de la Empresa***

El presente proyecto se lo realizó en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ubicada en la ciudad de Riobamba en la Facultad de Ciencias en el Laboratorio de Operaciones Unitarias perteneciente a la Escuela de Ingeniería Química. Ubicada a una altitud de 2822 m.s.n.m con coordenadas de 17 M 758393.95 m E UTM 9817026.05 m/S y con coordenadas geográficas de 1°40'28"S, 78°38'54"O Coordenadas: 1°40'28"S 78°38'54"O

#### ***1.3.2 Marco Conceptual***

##### *1.3.2.1 Residuos*

Se entiende por residuo a toda aquella materia que no posee un valor económico para la persona, pero el cual al ser reincorporado a un ciclo de producción mediante su recuperación comercial posee un valor, se puede tener dos tipos de residuos como lo son los residuos orgánicos e inorgánicos. (Ipiates, P 2018, p. 25-56)

Para el caso de los residuos que son originarios de restos de comidas, frutas, carnes, huevos, huesos de animales, legumbre, etc son conocidos como residuos orgánicos. Estos residuos forman parte principal para un programa de compostaje por lo que deben ser aislados de los diferentes materiales de desecho

Los desechos que presentan un origen no biológico sino de origen industrial o de un proceso no natural son conocidos como residuos inorgánicos, dentro de estos tipos de desechos se encuentran los plásticos, vidrio, etc.

### *1.3.2.2 Residuos Sólidos Urbanos RSU*

Son todos aquellos elementos, sustancias, objetos generados por actividades humanas son generados y dirigidos al abandono, estos pueden estar conformados por residuos de papel, cartón, plástico, metales, etc. Diariamente este tipo de residuos son originados en los hogares, oficinas de trabajo, restaurantes, hoteles, centros educativos, áreas públicas, mercados, entre otros.

Dentro de los residuos sólidos urbanos (RSU) encontramos plásticos de diferente tipo entre los cuales en su mayoría se encuentra el polietileno (PE) y polipropileno (PP) con un porcentaje mayor al 50% mientras que el poliestireno (PS), cloruro de polivinilo (PVC), polietilentereftalato (PET), poliestireno-butadieno (PS-BD), poli metacrilato de metilo (PMMA), etc., se encuentran en menores proporciones dentro de este tipo de residuos.

### *1.3.2.3 Reciclaje*

El reciclaje es un proceso mediante el cual se vuelve a un ciclo de vida un material que previamente fue desechado o usado para darle una nueva utilización, esto mediante procesos mecánicos o físico-químicos ayudando a reducir el impacto ambiental debido a la contaminación que estos residuos generan.

En el Ecuador desde el año 2002 se producían 336 ton/día de residuos plásticos de origen doméstico y agroindustrial, de lo cual solo el 22% se recicla adecuadamente dando lugar a una problemática ambiental que tiene dos variantes: La explotación de recursos no renovables de origen petrolero y problemas de disposición final a los residuos generados. (Mancheno, 2016, p.60-67).

Dentro de los distintos tipos de residuos clasificados en los hogares en el año 2016, el plástico fue el residuo con mayor clasificación (34,08%), en comparación al papel-cartón (24,53%) y vidrio 3 (15,10%) (Inec, 2016, p 5-19), esta práctica de reciclaje ayuda a recuperar las materias que son comúnmente desechadas para darles un uso alternativo o aprovechando energéticamente en lugar de arrojarlas al abandono o desecho.

Se estima que el 4% del crudo producido a nivel mundial, está dedicado a la industria del plástico. (British Plastic Federation Oil Construction, 2018). Dentro de las distintas formas en las que los residuos plásticos pueden ser tratados podemos mencionar las siguientes: primario, secundario, terciario, cuaternario.

➤ *Reciclaje Mecánico*

➤ *Reciclaje primario*

Este tipo de reciclaje se lo realiza para todos los plásticos sin excepción alguna, este proceso se lleva a cabo mediante una serie de pasos mecánicos para así obtener un producto parecido al original, consiste en la separación, limpieza. Es muy utilizado en distintas industrias fabricadoras de plásticos ya que así logran reaprovechar residuos limpios y seleccionados disminuyendo el consumo de materias primas.

➤ *Reciclaje secundario*

Mediante un reciclaje secundario a partir de plásticos post-consumo o post-industriales se logra conseguir plásticos con cualidades un poco inferiores a la original debido a los procesos por los cuales pasa, mediante este método no se aplica la separación ni limpieza de los residuos plásticos los cuales son triturados y mezclados obteniéndose un producto de segunda calidad con una ligera contaminación del producto final.

La recolección, clasificación y limpieza de los desechos plásticos se encuentra dentro de los primeros pasos en el reciclaje mecánico, una vez que se procedió con estos pasos los residuos plásticos se dirigen a una nueva fase en la cual se tritura o pelletiza para pasar a una extrusora para llegar a la formación de nuevos productos con una menor calidad a los originales, éstos se los puede utilizar mezclándolos con materia virgen, así reutilizando los productos plásticos desechados y reincorporarlos como nuevos productos.

➤ *Reciclaje Químico*

➤ *Reciclaje terciario*

El reciclado terciario, o "reciclado químico", persigue el aprovechamiento integral de los elementos constitutivos del plástico, por transformación del mismo en hidrocarburos, los cuales pueden ser materias primas integrables bien nuevamente en la ruta de obtención de plásticos o en otras rutas de la industria petroquímica. Los métodos pueden ser químicos o térmicos, dependiendo del tipo de polímero. (Arandes et al, 2004, p. 4-5)

El reciclaje terciario degrada al polímero a compuestos químicos básicos y combustibles. Este tipo de reciclaje es diferente de los dos primeros mencionados anteriormente fundamentalmente porque involucra un cambio químico, no sólo un cambio físico. En el reciclaje terciario las largas cadenas del polímero se rompen en pequeños hidrocarburos (monómeros) o monóxido de carbono

e hidrógeno. Actualmente, el reciclaje terciario cuenta con dos métodos principales: pirólisis y gasificación, no obstante, se están desarrollando otros métodos como la metanólisis y glicólisis (REZAGOS, 2018).

Al Salem (2017) dice: “El tratamiento químico, como su nombre lo indica, es el término utilizado para los métodos de tratamiento y los esquemas de reciclaje que dan como resultado el cambio de la estructura química del material plástico en sí.”

Este tipo de reciclado a diferencia del reciclaje mecánico no necesita la separación y la limpieza de compuestos plásticos, aquí se puede realizar un tratamiento químico a un polímero específico o una mezcla de polímeros.

Dichos métodos incluyen:

- ✓ Glucolisis
- ✓ Gasificación
- ✓ Aminólisis
- ✓ Pirólisis (Térmica y Catalítica)
- ✓ Hidrogenación

Estos procesos son una alternativa para la obtención de diferentes tipos de bio-combustibles mediante procesos que pueden utilizar infraestructuras parecidas a las de refinerías por lo cual se puede obtener energías alternativas a las derivadas del petróleo debido a la disminución de los pozos petrolíferos alrededor del planeta.

#### ➤ *Reciclaje cuaternario*

Para obtener una nueva fuente de energía se produce una degradación por medio del aumento de calor es decir una degradación térmica, esto se debe a la gran capacidad de energía calorífica de los diferentes tipos de polímeros (plásticos), este es el reciclaje cuaternario el cual ayuda a combatir la problemática ambiental y además de contribuir a la utilización adecuada de los espacios en los rellenos sanitarios.

Para poder minimizar en un gran porcentaje los desechos producidos y poder tener una disposición adecuada de los mismos en los rellenos se deben utilizar o manejar los distintos

métodos de reciclaje que además ayudan a reducir los altos costos de procesamiento de los residuos ayudando al ambiente.

**Tabla 1-1. Poder Calorífico de Diferentes Materiales**

Material	Plásticos	Carbón	Gas Natural	Fuel	Papel
Poder Calorífico (MJ/Kg)	46	29	48	44	17

Fuente: (Berenguer, 2008)

Realizado por: Nuñez Nelson, 2019

➤ *Ventajas y desventajas del reciclado*

Mediante el empleo correcto de los equipos adecuados e infraestructura óptima se puede disminuir y aumentar las desventajas y ventajas de los diferentes métodos de reciclaje ya que todos los métodos poseen más ventajas o desventajas que otros. Entre las muchas ventajas y desventajas podemos mencionar las siguientes:

**Tabla 2-1. Ventajas y desventajas del reciclaje de plásticos**

Reciclado	Ventajas	Inconvenientes
Mecánico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Procesos e instalaciones sencillas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necesidad de separación de los diferentes polímeros</li> <li>• Solo se aplica a plásticos termoestables</li> <li>• El material resultante es de menor calidad al original</li> <li>• Poca demanda en el mercado</li> </ul>
Recuperación de Energía	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obtención de energía</li> <li>• Instalación de la planta cerca de las ciudades</li> <li>• Bajo costo de tratamiento de los polímeros</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gran inversión inicial</li> <li>• Necesidad de depuración de gases</li> <li>• Costo de mantenimiento elevado</li> <li>• Generación de gran cantidad de cenizas</li> </ul>
Químico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No necesita separación de los residuos plásticos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necesidad de altas temperaturas</li> <li>• Formación de dioxinas y furanos</li> <li>• Se obtiene gran cantidad de productos</li> </ul>

Fuente: (Berenguer, 2008)

Realizado por: Nuñez Nelson, 2019

#### 1.3.2.4 Plásticos

Los plásticos se encuentran basados en la química del carbono por lo que son materiales orgánicos de gran peso molecular de los cuales su gran mayoría son sintéticos obtenidos a partir del petróleo mientras que los naturales son escasos como la celulosa y el caucho, se encuentran formados por moléculas de gran tamaño llamada macromoléculas las cuales estas formadas por la unión de elementos sencillos conocidos como monómeros asemejando a los eslabones de una cadena, además de poseer la capacidad de moldearse para lograr la forma requerida.

Se obtienen a partir de la unión de varios monómeros mediante una reacción de polimerización, esta reacción puede ocurrir por medio de reacciones de adición o condensación de pequeñas moléculas de carbono formando un carbocación dando lugar a una reacción en cadena finalizando una vez que el reactivo inicial se convierta en el producto deseado. (Ipiates, P 2018, p. 25-56)

Debido a la diversidad, su costo bajo, su fácil formación y otras características importantes los plásticos están presentes en todas las actividades que realiza el hombre y eso debido a que existe una gran variedad y diversidad de plásticos utilizados para diferentes actividades, entre éstas se encuentran las actividades realizadas en industrias, casas, movilización, comercio, alimentación, etc.

Por ellos los plásticos han reemplazado a varios materiales tradicionales como metales, cerámicas, y otras aplicaciones como micro electricidad, biomedicina y comunicaciones (Salinas & Vazquez, 2010), por este motivo los plástico han tomado una gran importancia debido a su crecimiento desmesurado lo cual genera una gran cantidad de residuos los cuales no son tratados de manera adecuada en la gran mayoría de ciudades.

Los plásticos se encuentran divididos en varios grupos dependiendo la función y características que estos posean, según su comportamiento térmico-mecánico se puede establecer 3 grupos de plásticos:

- ✓ Termoplásticos
- ✓ Elastómeros
- ✓ Termoestables

➤ *Termoplásticos*

Son aquellos plásticos que tras un aporte calórico se deforman, adquieren plasticidad y abandonan el estado sólido, alcanzando un estado líquido-viscoso. Cuando el aporte calorífico termina y se



enfrián a temperatura ambiente vuelven a adquirir un estado sólido y son capaces de absorber esfuerzos mecánicos (Hernandez R., 2007, p 27-30).

Entre los plásticos más comunes dentro de este grupo se encuentran:

- Policloruro de vinilo (PVC)
- Poliestireno (PS)
- Polietileno (PE)
- Polipropeno (PP)
- 1-Polibuteno (PB)

➤ *Elastómeros*

Estos plásticos son aquellos que a una temperatura ambiente pueden ser deformados sin romperse, son blandos y poseen una consistencia gomosa por lo cual luego de estirarse varias veces pueden recuperar su forma inicial sin deformarse su estructura, los elastómeros de gran tamaño una vez que se entrelazan no pueden volver a ser procesados.

Dentro de este grupo se encuentran los siguientes tipos de plásticos:

- ✓ Cauchos
- ✓ Gomas
- ✓ Látex
- ✓ Polisopreno

➤ *Termoestables*

Estos materiales son blando o llamados plásticos únicamente cuando son calentados por primera vez ya que después de su enfriamiento estos ya no pueden recuperarse para otras transformaciones, a temperatura ambiente estos poseen una estructura dura y frágil pero estos resisten a las altas temperaturas o calor a la que sea sometida.



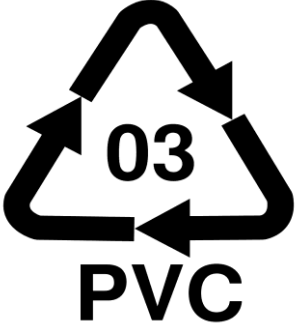

Dentro de este tipo de plásticos se encuentran:



- ✓ Resinas
- ✓ Fenoplásticos o plásticos de Fenol-Formaldehido

#### *1.3.2.5 Tipos de plásticos de reciclaje según la Norma INEN 2634*

Los diferentes plásticos utilizados para ser reciclados son identificados por una serie de símbolos y abreviaturas establecidas por la Sociedad de la Industria de Plásticos (SPI), por lo cual cada plástico es identificado por un símbolo y abreviatura específica.

**Tabla 3.1 Clasificación de los plásticos de reciclaje según SPI**

Número	Abreviatura	Nombre Completo
1	PET (en inglés PETE)	Tereftalato de polietileno 
2	PET	Polietileno de alta densidad 
3	V, PVC	Vinilo, Policloruro de Vinilo 
4	PE-BD(en inglés LDPE)	Polietileno de baja densidad 
5	PP	Polipropileno

		
6	PS	Poliestireno 
7	Otros	Incluye las demás resinas y los materiales multicapa. Poliuretano (PU), Acrilonitrilo-butadiestireno (ABS), Policarboboato (PC), Biopolimeros.

Fuente: (INEN 2634, 2012)

Realizado por: Nuñez Nelson, 2019

➤ *Tereftalato de polietileno PET*

Es un plástico que pertenece al grupo de los termoplásticos, es decir que puede ser moldeado al momento de aumentar su temperatura y se lo puede repetir en muchas ocasiones, éste se obtiene por la reacción de polimerización del ácido tereftálico y el etilenglicol, su demanda es muy alta en todo el mundo debido a sus características: brillo, transparencia, resistencia a los impactos, entre otros, garantizan los requerimientos necesarios para ser utilizados como envases para el transporte y conserva de alimentos y debido a su composición es posible su reciclaje.

El PET es un plástico que puede ser reciclado preferiblemente mediante un tratamiento mecánico es decir separándolo de los demás plásticos para así pelletizarlo y mezclarlo con materia virgen y dar un nuevo producto (envases) para el almacenamiento y transporte de alimentos.

Generalmente este tipo de plástico se lo utiliza para fabricar envases de bebidas por ejemplo: agua, energizantes, gaseosas, entre otros, estos son muy bueno para almacenar lo que son líquidos durante un tiempo determinado.

➤ *Polietileno de alta densidad HDPE*

Es un polímero termoplástico que se obtiene por polimerización del etileno o etano de fórmula molecular  $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n$ , es un material parcialmente cristalino y parcialmente amorfo, de color blanquecino y translucido. Los diversos tipos de Polietileno que se encuentran en el mercado son el resultado de las diferentes condiciones de operación, llevadas a cabo en la reacción de polimerización, con buenas propiedades físicas, químicas y mecánicas lo cual lo hace el plástico más consumido a nivel mundial. (Roca, 2005, p. 30-33)

• *Policloruro de Vinilo PVC*

El PVC es un termoplástico que al ser sometido a altas temperaturas sus características se van perdiendo como son su dureza por lo cual este se ablanda, por otra parte es muy resistente y de bajo peso, su obtención se da por la polimerización del Cloruro de Vinilo  $\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$  y por sus propiedades es un material que se puede reciclar para darle un nuevo uso introduciéndolo a un nuevo proceso.

Este tipo de plástico se encuentra compuesto por cloruro de sodio (NaCl) en un 57% y por petróleo en un 43%.

• *Polietileno de Baja Densidad LDPE*

Pertenece al grupo de los termoplásticos y se los utiliza comúnmente para objetos que no necesiten una resistencia y firmeza marcada como son fundas plásticas, embalaje, entre otros, estos al poseer una resistencia a la electricidad son muy utilizados como recubrimiento para cables eléctricos.

Este polímero se produce por la polimerización de etileno o etano  $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n$  y así el monómero se va uniendo continuamente hasta llegar a la formación del polietileno.

- *Polipropileno*

El polipropileno (PP) pertenece a familia de los termoplásticos. Se lo obtiene mediante la polimerización del propileno el cual es un subproducto de la refinación del petróleo, desarrollado en presencia de un catalizador mediante el control de dos aspectos importantes como lo son la temperatura y la presión. El polipropileno puede estar establecido por tres tipos: homopolímero, copolímero rándom y copolímero de alto impacto; entre sus principales características se encuentra su gran resistencia química, posee una gran fuerza y elevado punto de fusión por lo que es apto para ser llenado con líquidos en calientes, piezas de moldeado, fibras, etc.

Entre las características más importantes de este plástico se encuentran:

- ✓ Optima relación Costo / Beneficio.
- ✓ Versatilidad: compatible con la mayoría de las técnicas de procesamiento existentes y usado en diferentes aplicaciones comerciales, como, packaging, industria automotriz, textiles, menaje, medicina, tuberías, etc.
- ✓ Buena procesabilidad: es el material plástico de menor peso específico (0,9 g/cm<sup>3</sup>), lo que implica que se requiere de una menor cantidad para la obtención de un producto terminado.
- ✓ Barrera al vapor de agua: evita el traspaso de humedad, lo cual puede ser utilizado para la protección de diversos alimentos.
- ✓ Buenas propiedades organolépticas, químicas, de resistencia y transparencia (British Plastic Federation Oil Constrution, 2018).

- *Poliestireno*

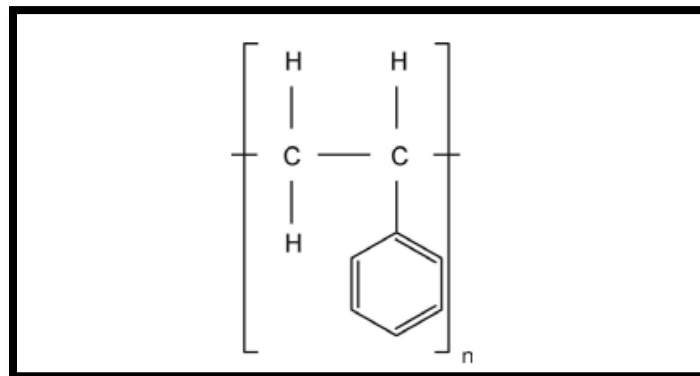
El poliestireno (PS) es un polímero de origen hidrocarburífero que se obtiene a partir del monómero estireno mediante la reacción de polimerización. Por sus propiedades el poliestireno es uno de los plásticos con más amplia aplicación debido a que puede copolimerizar con distintos monómeros, además de los envases este polímeros puede ser utilizado en diversos casos de indumentaria deportiva, por ejemplo, puede ser utilizado en la fabricación de chalecos salvavidas debido a su propiedad para flotar además de distintos objetos para deportes acuáticos. También se utilizan como aislantes que mantienen la temperatura de distintas bebidas por un largo tiempo debido a su propiedad aislante.

El poliestireno (PS) es un plástico totalmente reciclable. Para facilitar su identificación a los fines del reciclado tiene el número 6 en el símbolo del reciclado que se imprime en los envases. El

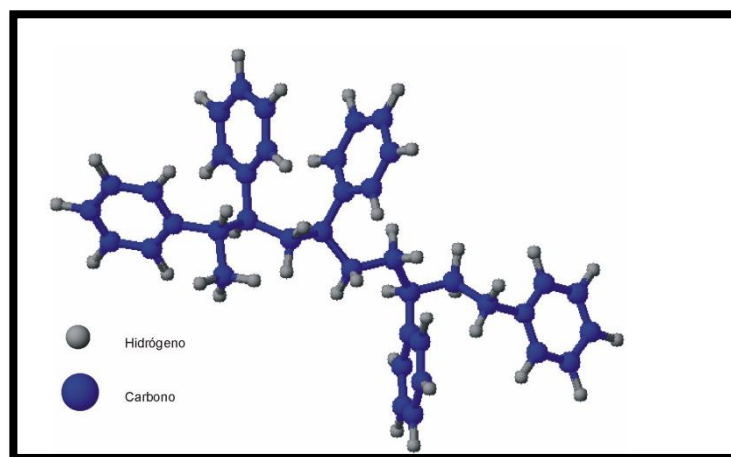
poliestireno (PS) es un polímero que se obtiene a partir del monómero estireno por reacciones de polimerización. (British Plastic Federation Oil Construction, 2018)

### ✓ Estructura del poliestireno

El poliestireno es un termoplástico amorfo, también conocido químicamente como polivinilbenceno, los grupos bencénicos característicos de este polímero quedan distribuidos aleatoriamente a lo largo de la cadena polimérica. (Parres F, 2005)



**Figura 1-1:** Esquema de la molécula de PS  
Fuente: Parres, 2005



**Figura 2-1:** Esquema de la molécula de PS  
Fuente: Parres, 2005

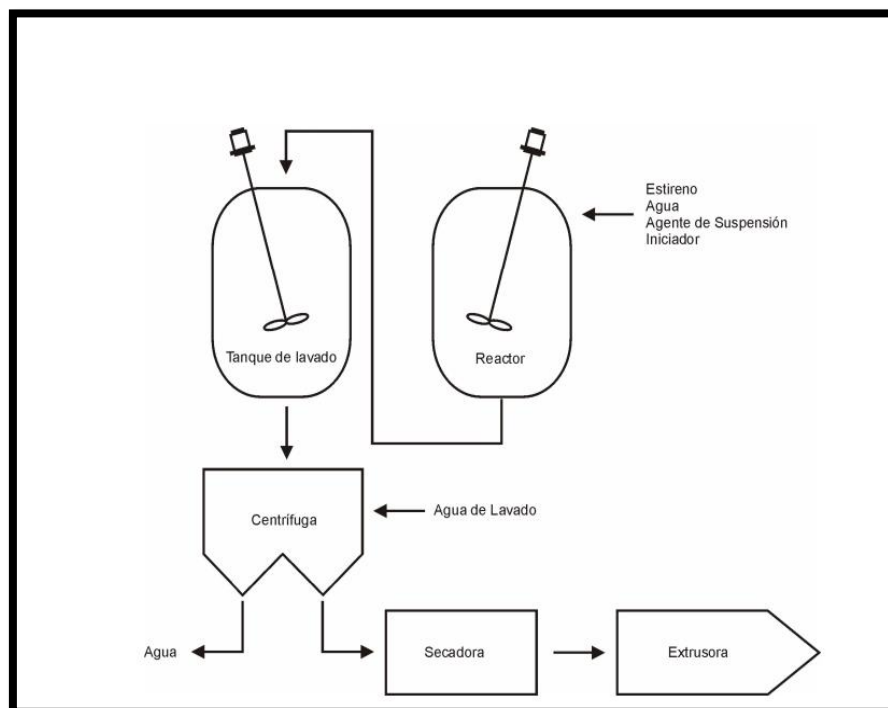
### ✓ Síntesis del poliestireno

El monómero del poliestireno (estireno) posee una capacidad de reacción consigo mismo y polimerizar, inclusive a temperatura ambiente al ser sometido a exposiciones a radiaciones y estar en contacto con el aire.

La fabricación de homopolímeros de estireno se realiza normalmente por polimerización en masa, en menor cantidad también por suspensión. Un proceso de masa modificado trabaja con un 5 –

25 % de disolvente, por lo general etilbenceno. Para determinados copolímeros se siguen utilizando la polimerización en emulsión (ABS). En la polimerización en masa, el estireno recibe un tratamiento exclusivamente térmico o bien se le agrega iniciadores adicionales (polimerización por radicales) que lo excitan para la reacción. Los procesos que han dado mejores resultados han sido los de reactor tipo torre o los provistos de agitador. Ambos sistemas suministran polímeros de gran pureza. En la torre, el estireno entra a una temperatura de 80 °C y contiene aproximadamente un 30 % de material sin polimerizar. Esta masa viscosa, como jarabe, polimeriza dentro del reactor torre, con temperaturas que van en aumento a medida que se baja por la columna, de 110 a 180 °C. El poliestireno terminado sale aproximadamente a unos 220 °C en forma de masa viscosa por el extremo inferior del reactor, siendo desplazado por un potente husillo de transporte. Posteriormente se realiza la extrucción en forma de cinta o macarrón, se enfría y se granula. El monómero residual sin reacción se elimina, normalmente con vacío. (Valencia, 2005)

Por otro lado, la polimerización en suspensión se inicia con el estireno, provisto de iniciadores (peróxidos), repartido en forma de gotas finas en el seno del agua, la polimerización se inicia a 70 – 90 °C y se remata a 90 – 120 °C y una presión de 5 bar. El poliestireno así fabricado tienen forma de perlas pequeñas, que se separan del agua por centrifugación o filtrado. Después se lavan y se secan (Valencia, 2005).



**Figura 3-1:** Diagrama esquemático del proceso de obtención del PS mediante polimerización por suspensión

Fuente: (Parrales, 2005)

### *1.3.2.6 Pirólisis*

La pirólisis o también conocida como termólisis es un proceso en el que se produce la degradación de compuestos de carbono esto al ser sometido a altas temperaturas dentro de un reactor en ausencia de oxígeno, los compuestos degradados son transformados en nuevos compuestos de utilidad tras cambios físicos y químicos, el resultado de este proceso son biocombustibles, gases y cenizas.

Según Sullivan A. y Ball R., (2012) la pirólisis: “es un proceso termoquímico que convierte la materia orgánica en combustibles útiles, con un alto rendimiento, mediante calentamiento a temperatura moderadamente alta (350-650°C) y en ausencia de oxígeno. Por su capacidad de tratamiento, es el método más eficaz para competir con las fuentes de combustibles no renovables”.

La pirólisis térmica se encuentra dentro del tipo de reciclaje químico o terciario permitiendo eliminar las desventajas que presenta el reciclado mecánico como es la selección de los residuos su limpieza evitando la mezcla con productos no deseados, mediante la pirólisis se logra obtener monómeros mediante la ruptura de enlaces de cadenas más largas de distintos polímeros, dentro de este proceso juega un papel importante la gestión de residuos plásticos ya que nos ayudará a realizar con éxito.

Una corta exposición a altas temperaturas recibe el nombre de pirólisis rápida, y maximiza el producto líquido. Si se aplican temperaturas más bajas durante períodos de tiempo más largos, predominarán las cenizas sólidas (CARE, 2017).

En el proceso de la pirólisis se encuentran varias ventajas tanto en lo operacional como ambiental debido a la creciente demanda a nivel mundial de la búsqueda de nuevas técnicas para obtener energías alternativas y al constante cambio en el precio del petróleo, adquiriendo un método amigable al ambiente y con mayor eficiencia que otros métodos de reciclaje de plásticos esto por la disminución de la emisión de gases invernaderos como son el CO<sub>2</sub>.

### *1.3.2.7 Pirólisis térmica*

Este tipo de pirólisis también conocida como cracking térmico, este proceso se lo lleva a cabo a temperaturas altas comprendidas entre 300 °C y 800 °C en la que se produce un cambio térmico



de distintos residuos orgánicos. Al ser sometidos a altas temperaturas estos materiales (plásticos) se descomponen en gases, líquidos y sólidos. (Ipiates, P 2018, 36).

Una pirólisis realizada en tiempos cortos a temperaturas muy altas se la conoce como pirólisis rápida en la que el producto predominante es líquido mientras que al exponer los residuos a temperaturas menores el producto mayoritario son cenizas sólidas.

Dentro de los últimos 10 años el concepto de pirólisis ha tomado mucha relevancia ya que se ha realizado estudios de diferentes plásticos y mezclas de algunos obteniendo buenos resultados en lo que se refiere la disposición final de los residuos plásticos y dando como resultado derivados de hidrocarburos con una capacidad calorífica muy buena.

La estrategia perseguida en la pirólisis térmica es la optimización del proceso para conseguir los productos más rentables, recuperando los monómeros tales como etileno, propileno, estireno, y obteniendo un elevado rendimiento de aromáticos: benceno, tolueno, xilenos. Los elevados requerimientos energéticos de la pirólisis pueden compensarse mediante la combustión parcial de los plásticos, de forma que la pirólisis se pueda auto mantener térmicamente en el intervalo 600-800 °C. (Kaminsky & Rössler, 1992, p 108).

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

Los distintos tipos de procesos de pirólisis se clasifican de acuerdo a variables como la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia y la temperatura final en: carbonización, pirólisis convencional, pirólisis rápida, pirólisis flash de gases y líquidos, pirólisis ultra rápida, pirólisis a vacío, hidropirólisis y metano pirólisis. (Ipiates, 2018)

#### *1.3.2.8 Factores que Influyen las Reacciones de Pirólisis*

Entre los factores que se deben tomar en cuenta dentro del proceso de pirólisis térmica son:

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

Estos factores afectan en el resultado de la pirólisis debido a que pueden obtenerse productos que no son beneficiosos o que sean peligrosos para la salud como lo son furanos (gas volátil muy inflamable que puede tener un punto de ebullición cercano a 21 °C) y dioxinas (compuestos clorados)

Existen diferentes factores que pueden afectar el producto de la pirólisis pero que aún no han tenido un estudio profundo entre los cuales se puede mencionar:

- ✓ Pureza de la materia prima
- ✓ Solventes
- ✓ Entre otros

➤ *Temperatura*

Dentro del proceso de pirólisis térmica el factor más importante a tomar en cuenta es la temperatura, al variar desde los 200°C hasta los 800°C, la función que cumple la temperatura en si es el rompimiento de los enlaces químicos de las moléculas, debido al incremento de las vibraciones la fuerzas de Van der Wall colapsan, resultando en el rompimiento del enlace Carbono-Carbono.

Según Remedio Hernández (2007): menciona que; “dentro de la pirólisis se puede distinguir tres etapas de temperatura:”

- ✓ Entre 220°C y 330°C: la fracción que mayor se obtiene de la descomposición de los materiales plásticos son sólidas como: cenizas y coque.
- ✓ Entre 330°C y 450°C: las fracciones líquidas tienen un alto rendimiento, mientras que la generación de gases se da en menor cantidad.
- ✓ Las temperaturas mayores a 500°C los plásticos pasan su punto de ebullición y la fracción con mayor rendimiento son gases.

Se puede decir que es una de las variables más importantes que interviene en el proceso de pirólisis dado que, para obtener un mayor porcentaje de productos, tanto fracciones líquidas como fracciones gaseosas y en menor proporción cenizas, la temperatura de reacción debe ser elevada de lo contrario los productos no serán los deseados.

➤ *Tiempo de residencia*

Un factor muy importante que influye en el proceso de la pirólisis térmica es el tiempo que el polímero se encuentra dentro del reactor, así el producto final se ve afectado, donde los gases condensables incrementan al aumentar el tiempo de residencia de la materia prima.

Esto se debe a que al tener un mayor tiempo de residencia a la materia prima se producirá una cantidad de productos más estable térmicamente esto conlleva a una mayor producción de fracciones líquidas. Dentro de esto se puede decir que el tiempo de retención no es proporcional al aumento de temperatura.

Entre las diferentes variables que pueden influir en el proceso de pirólisis cabe destacar el tiempo de residencia en el interior del reactor de los compuestos volátiles generados ya que durante este tiempo pueden tener lugar las reacciones secundarias y terciarias, modificando la distribución de productos obtenidos en la primera etapa de la descomposición del polímero. (Hernandez R., 2007, p 27-30)

El tiempo que los polímeros permanecen dentro del reactor es fundamental en la pirólisis de materiales plásticos debido a que mayor sea el tiempo de residencia la fracción líquida será mayor, mientras que la fracción gaseosa se da en menos cantidad al igual que los sólidos se da en pequeñas cantidades.

➤ *Tipo de reactor utilizado*

Dentro de la pirólisis térmica de plásticos una de las variables con mayor relevancia es el tipo de reactor que se utilizara, esto a que la temperatura, presión, tiempo de residencia y otras variables tendrán una influencia mayor o menor en los productos finales que con el tipo de reactor.

Dentro del estudio de la influencia del tipo de diseño de reactor en la obtención de los productos es complicado pero existen varios reactores donde se ha realizado el estudio de la influencia de estos en la pirólisis térmica:

- ✓ Reactor de lecho fluidizado FCC
- ✓ Reactor de tanque agitado
- ✓ Tratamientos gravimétricos TGA
- ✓ Reactor extrusor
- ✓ Entre otros

➤ *Tamaño de la partícula de polímero*

El tamaño del polímero es un factor que ayuda a la transferencia de calor debido a que a mayor tamaño de la partícula menor será la rapidez en la que se calienta mientras que las partículas de menor tamaño se calientan de forma más rápida debido a su menor área de transferencia.

En su investigación (Karaduman & et , 2001) demostró que mientras menor es el tamaño de la partícula que se pirolizó menor en la cantidad de fracción sólida obtenida, y las fracciones líquidas y gaseosas tuvieron mayores rendimientos.

Esto se comprueba en diferentes estudios en los que el tamaño de la partícula se ve disminuido obteniéndose fracciones líquidas y gaseosas mientras que las cenizas se ven disminuidas debido al tamaño de la partícula.

➤ *Catalizador*

Un catalizador es un material que puede acelerar o retardar una reacción química, en el caso de la pirólisis éste favorecerá la obtención de los productos deseados ya que no intervienen en la reacción química, los catalizadores poseen una selectividad muy alta debido a sus centros activos donde se da intercambios electrónicos favoreciendo así la velocidad de la reacción química.

Dentro de la pirólisis térmica de residuos plásticos existe una gran cantidad de productos líquidos, gaseosos y sólidos. Se ha realizado el estudio en diversas bibliografías, la incorporación de estos catalizadores para que incrementen el rendimiento del proceso de obtención de los productos valiosos industrialmente.

Para obtener una mayor eficiencia en la pirólisis de plásticos la utilización de catalizadores ácidos es la mejor opción ya que estos por sus centros activos facilitan la ruptura de los enlaces Carbono-Carbono y facilitan la transferencia de hidrogeno.

**Tabla 4-1.** Características físico química de ciertos catalizadores

<b>Propiedad</b>	<b>HZSM-5</b>	<b>MCM-41</b>	<b>USY</b>	<b>E-Cat 1</b>
Tamaño de Poro (nm)	0.51x0.55	2.4	0.74	1.7
Área BET (m <sup>2</sup> /g)	334	1136	614	956
Area Externa (m <sup>2</sup> /g)	67	383	28	126
Volumen de Poro (cm <sup>3</sup> /g)	0.27	1.34	0.35	1.00
Relación SiO <sub>2</sub> /AlO <sub>3</sub>	24	47	4.8	7
Acidez Total (mmol/g)	1.4	0.7	2.1	2.1
Acidez débil (mmol/g)	0.8	0.7	2.1	1.4
Acidez fuerte (mmol/g)	0.6	-----	-----	0.7

**Fuente:** (Berenguer, 2008)

**Realizado por:** Nuñez Nelson, 2019

### 1.3.2.9 *Cinética de reacción de la degradación de plásticos*

Para describir las reacciones que ocurren en el proceso de degradación de plásticos es muy difícil, debido a que el proceso por el que pasan es muy complejo, como también existen factores que influyen en la descomposición térmica ya que se puede dar en presencia o no de agentes que aceleren o retarden el proceso entre estos están los catalizadores, otros factores que pueden afectar la degradación térmica es el tipo de reactor que se utiliza, el tipo de plástico y el tamaño de las partículas y su cantidad.

La degradación termocatalítica o degradación térmica en presencia de catalizadores se realiza en reactores discontinuos en un 95%, dentro de los cuales los análisis termo gravímetros son los que predominan, este análisis se lo realiza para determinar la temperatura a la que el polímero se degradara y así mantener un rango de temperatura en el proceso de pirólisis térmica.

La pirólisis térmica se la puede realizar en reactores de tipo continuo en los cuales para su proceso es necesario grandes cantidades de desecho para que se mantenga constante el procesos, surgen varias dificultades para este procesos debido al diseño del reactor y la gran cantidad de polímeros, además de los catalizadores utilizados, también su regeneración. Dentro de esto se ha dado a conocer modelos cinéticos de la degradación térmica de los plásticos. Para averiguar las propiedades de degradación se ha utilizado el enfoque de la cinética de primer orden.

#### ➤ *Modelo cinético*

El fin que tiene realizar la experimentación es detallar los parámetros cinéticos de reacción como son las energía de activación, la velocidad de reacción, entre otros, de las fracciones volátiles obtenidas como son las fracciones gaseosas y líquidas productos de la degradación. Por otra parte un aspecto importante es la predicción del rendimiento o de las propiedades de las fracciones obtenidas por el conocimiento de la materia prima y sus propiedades. Uno de los problemas más notorios en este caso es derivar la constante de velocidad de reacción dado que algunos de los factores intervienen de manera importante en el proceso de degradación.

Por lo general, se postula un valor constante de la velocidad de reacción y se usa la ecuación cinética de primer orden junto con la ecuación de Arrhenius. Las relaciones se vuelven más difíciles cuando se consideran las reacciones auto-catalíticas. Existen algunas correlaciones para calcular los parámetros cinéticos de la reacción en circunstancias dinámicas. La energía de activación y la constante pre-exponencial se determinan a partir de la forma logarítmica de la ecuación de Arrhenius: (Buekens 2006).

$$-\frac{dm}{dt} = km^n$$

$$k = A_0 e^{-\frac{E}{RT}}$$

Donde:

$m_0$  = es el peso de la muestra

$n$  = es el orden de reacción

$k$  = es el coeficiente de la velocidad de reacción

$m$  = es el peso del residuo

$t$  = es el tiempo de degradación

$E$  = es la energía de activación

$A_0$  = es la constante pre-exponencial

Las relaciones pueden simplificarse mediante el uso de métodos termogravimétricos (TGA), pero se debe introducir un nuevo parámetro; este nuevo parámetro es la velocidad de calentamiento. La Tabla 5.1 se muestra algunos de los enfoques que se utilizan para la determinación de parámetros cinéticos

**Tabla 5-1.** Ecuaciones cinéticas para polímeros

MÉTODO	ECUACIÓN
Flyn-Wall	$\Delta \ln = -1052 \frac{E_a}{R} \Delta \left( \frac{1}{T} \right)$
Friedmann	$\ln \left( \frac{dx}{dt} \right) = \ln A + n \ln(1 - \infty) + \ln(\infty) - \frac{E_a}{T}$
Kissinger	$\ln \left( \frac{\beta}{T^2} \right) = -\frac{E}{RT} + \left[ \ln \left( \frac{AR}{E} \right) - \ln F(x) \right]$
Ozarawa	$\ln \beta = -0.4567 \frac{E}{RT} + \log \frac{AE}{R} - \log F(x) - 2.315$

Horowitz–Metger	$\ln \left[ \ln \left( \frac{1}{a - \infty} \right) \right] = \frac{E_a \phi}{RT^2}$
-----------------	--------------------------------------------------------------------------------------

Fuente: Buekens. (2006)

Realizado por: Nuñez Nelson, 2019

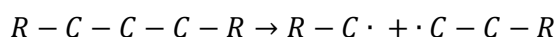
Al comparar las ecuaciones que se muestran en la tabla se determinó que las ecuaciones de Flynn-Wall, Horowitz-Metger y Friedmann; dieron una excelente correlación en el caso de la degradación del polipropileno, mientras que los otros crearon un software para calcular los parámetros cinéticos de la reacción utilizando la ecuación cinética de primer orden basada en estas ecuaciones. Los parámetros clave se calcularon con la minimización de las diferencias entre los resultados calculados y experimentales obtenidos directamente por un análisis termogravimétrico. (Jordán & Zurita, 2018, p. 16)

### ➤ *Mecanismo de reacción*

El ión carbonilo posee una química que conduce a la reacción y esta incluye varias fases como es la transferencia de hidrógeno, el corte de la cadena polimérica, isomerización, oligomerización, alquilación y aromatización. En el proceso de pirólisis térmica se presenta un mecanismo de iones carbonilo en el que se forman radicales libres, entre los cuales se menciona a continuación:

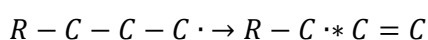
#### ✓ Iniciación

La etapa de iniciación se puede presentar por algún defecto en la cadena polimérica. Por ejemplo

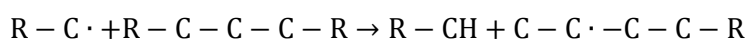


#### ✓ Propagación

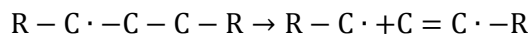
El peso molecular de las cadenas poliméricas principales puede reducirse a través de sucesivos ataques de los sitios ácidos u otros iones carbonilos y rompimiento de cadena, produciéndose una fracción oligomérica (aproximadamente C30 – C80). Posteriores rompimientos de la fracción oligomérica probablemente por corte- directo de iones carbonilo de fin de cadena lleva tanto a la formación de gases por un lado, como a una fracción líquida (aproximadamente C10 – C25) por el otro (Contreras F. 2014, p 15-17).



(β – escisión del radical primario)



(Transferencia de cadena, producción de alcano)



( $\beta$  - escisión, producción de alquenos)

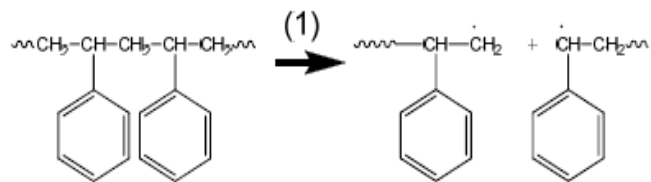
✓ Terminación

Se produce al combinarse 2 radicales y así producirse la formación de una cadena de polímero

### Degradación térmica del poliestireno

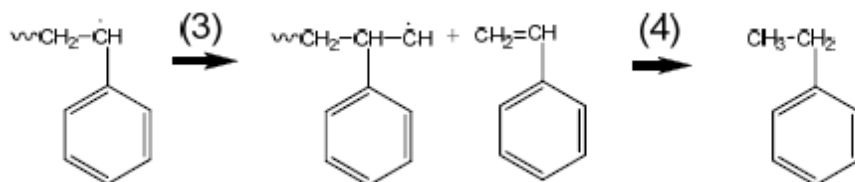
✓ Iniciación

Las macromoléculas reaccionan mediante ruptura de enlaces C-C (1) dando lugar a radicales primarios de diferente tamaño molecular.

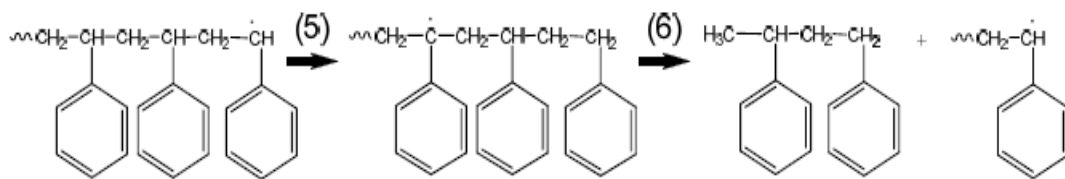


✓ Propagación

Los radicales libres de polímero actúan como productos intermedios y, a través de reacciones de fin de cadena, se obtienen unos productos de bajo peso molecular. Las principales reacciones que se llevan a cabo son: ruptura de final de cadena en la posición  $\beta$  para producir monómero y un nuevo radical; y transferencia intramolecular de hidrógeno, que implica una abstracción de un hidrógeno de otro carbono cercano dentro de la misma cadena, con la posterior ruptura en la posición  $\beta$  de enlaces C-C de los radicales que han sufrido transferencia del hidrógeno, dando lugar a la formación dimeros y/o trímeros y otro radical. (Thermal, Mechanisms and Conditions, 2012)

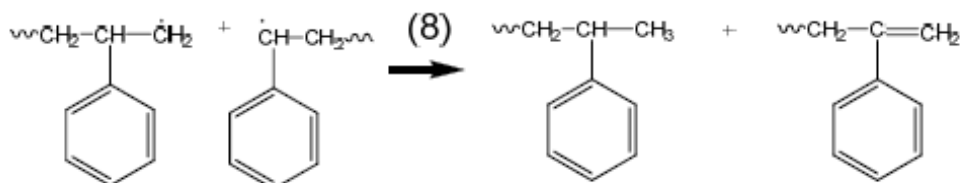
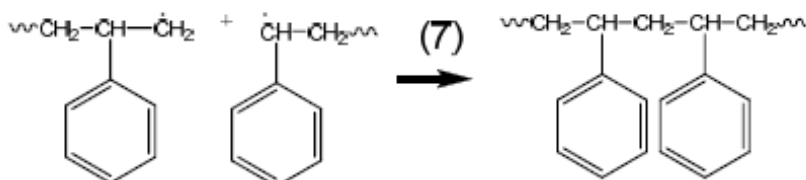






✓ Terminación

En este tipo de reacciones, los radicales reaccionan para dar lugar a moléculas más estables limitando la continuidad de la degradación del poliestireno. Las reacciones más comunes son: recombinación, donde dos radicales se unen para dar una nueva molécula, y desproporciónación, donde dos radicales reaccionan para dar lugar a una molécula de polímero saturada y a una cadena con insaturación (Thermal, Mechanisms and Conditions, 2012).

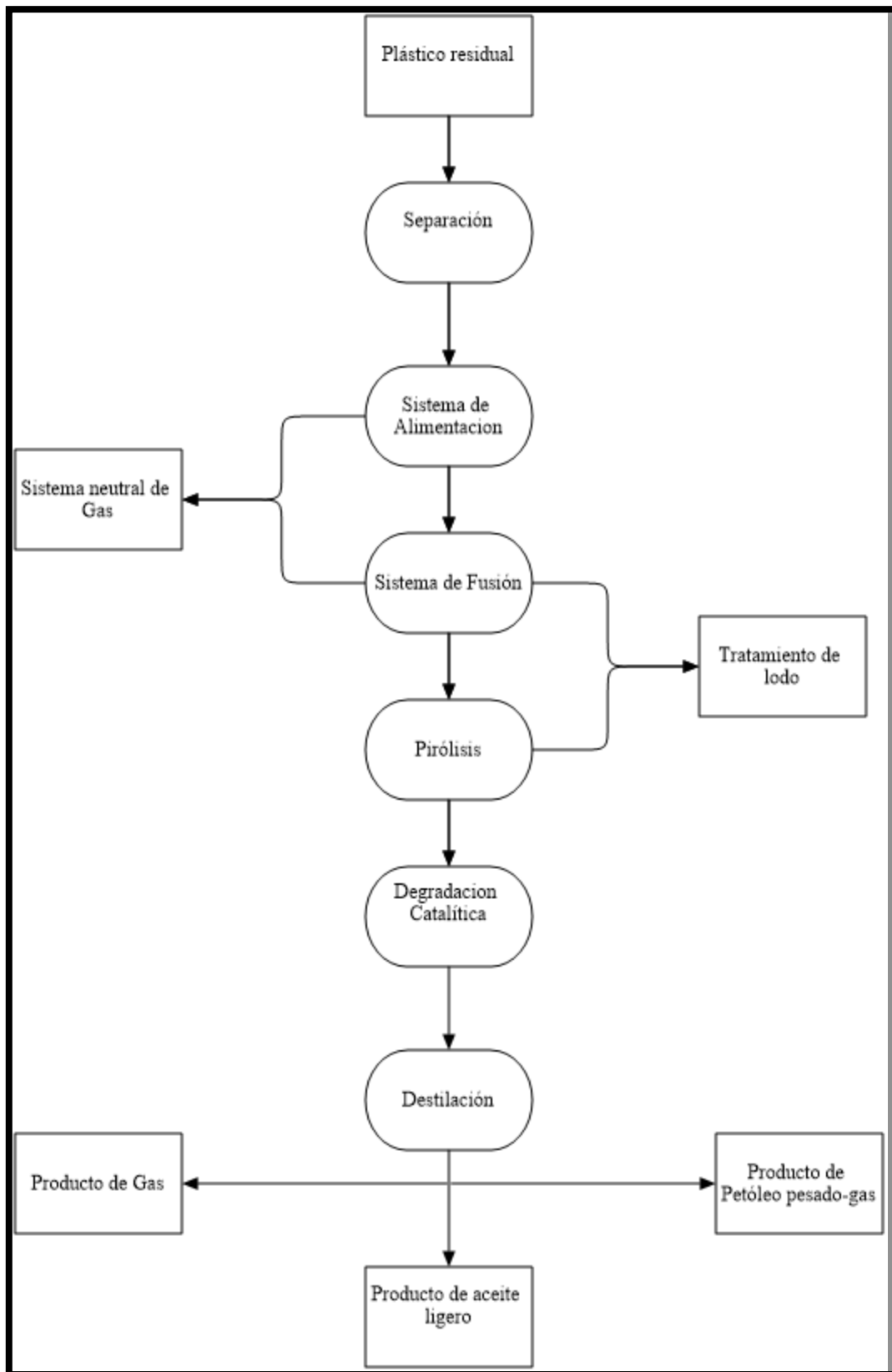


1.3.2.10 Diagrama de flujo del proceso de pirólisis

Los residuos plásticos originados en escuelas, colegios, hogares, industrias, entre otros, son utilizados para el proceso de pirólisis térmica para conseguir productos derivados del petróleo. Los residuos son usados para la obtención de productos valiosos pero así mismo se encuentran mezclados con distintos tipos de partículas contaminantes ya sean polvos, maderas, hierros, etc., a parte de estos como se conoce existen diferentes tipos de plásticos que no suelen ser utilizados directamente en el procesos de la pirólisis por ser de distintas procedencias, por lo que a continuación se procede a realizar tratamientos de separación para obtener un residuo homogéneo, de no proceder a realizar dicho tratamiento se puede encontrar con materiales contaminantes que provocarían un déficit en la parte económica ya que aumentaría el costo total del proceso de reciclaje.

Por lo tanto un aspecto importante dentro del proceso de pirólisis es la selección y clasificación de los plásticos producto de los desechos, excluyendo en el tratamiento sobre todo al PVC y PET ya que estos pueden generar emisiones que causan problemas esto debido a la presencia de Cl. El material de desecho debe ser separado individualmente como son termoplástico, PVC, PET, hierro, papel, etc.

En el siguiente diagrama de flujo se encuentra detallado el proceso que los plásticos deben seguir antes de su tratamiento:



**Figura 4-1.** Diagrama de flujo del proceso para residuos de plásticos en recuperación de hidrocarburos

Fuente: Adaptado de Buenkes, (2006)

Realizado por: Nuñez Nelson, 2019

## **1.4. Beneficiarios directos e indirectos**

### **1.4.1 Beneficiarios Directos**

Los beneficiarios directos de este proyecto serán los estudiantes, docentes e investigadores de la carrera de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias, de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, porque este trabajo de titulación servirá como pauta para futuras investigaciones y proyectos.

### **1.4.2 Beneficiarios Indirectos**

Los beneficiarios indirectos de este proyecto serán los estudiantes de las distintas carreras de la Facultad de Ciencias. Aparte de las distintas empresas que sean generadoras de grandes cantidades de residuos plásticos podrán utilizar este proceso para la reducción de la contaminación y además así obtener nuevas fuentes de energía para su propio beneficio

## **CAPITULO II**

### **2. OBJETIVOS**

#### **2.1 General**

- ✓ Obtener combustible a partir de la pirólisis térmica de poliestireno

#### **2.2 Específicos**

- ✓ Determinar la temperatura y tiempo óptimo a los cuales el poliestireno tendrá un mayor rendimiento en función del porcentaje de líquido obtenido.
- ✓ Analizar los combustibles obtenidos; mediante diferentes pruebas físico-químicas (punto de ignición, punto de inflamación, densidad, viscosidad, índice de cetano)
- ✓ Realizar la comparación del combustible líquido con la respectiva NORMA de biocombustible

## CAPITULO III

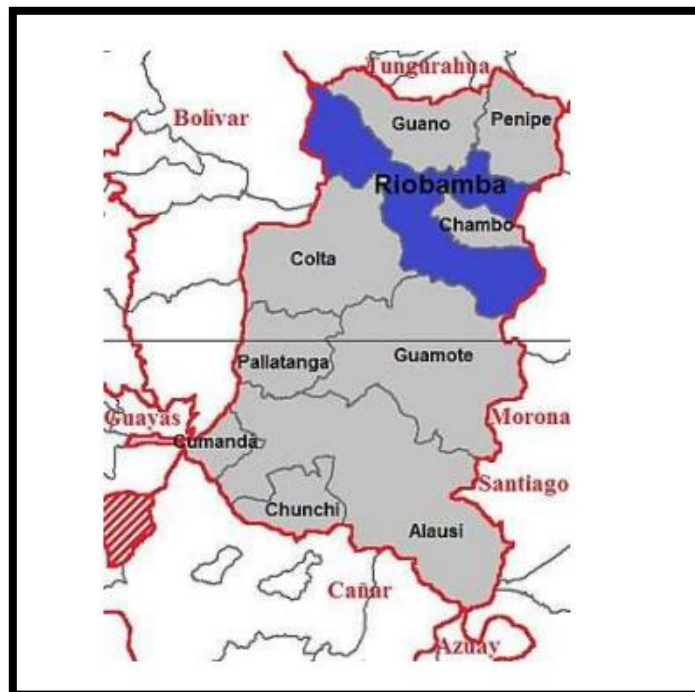
### 3. ESTUDIO TÉCNICO

#### 3.1. Localización del proyecto.

El presente trabajo de titulación de carácter técnico fue implementado en la Provincia de Chimborazo, en la ciudad de Riobamba, dentro de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en la Facultad de Ciencias, específicamente dentro del Laboratorio de Operaciones Unitarias perteneciente a la Escuela de Ingeniería Química. Los límites son:

- ✓ Norte: Cantones de Guano y Penipe
- ✓ Sur: Cantones de Colta y Guamote
- ✓ Este: Cantón Chambo
- ✓ Oeste: Provincia de Bolívar.

(GADCH, 2016)



**Figura 1-3:** Mapa del Cantón Riobamba

Fuente: Cartografía Base, Instituto Geográfico Militar

Realizado por: Javier Alba, 2018

- ✓ **Clima.** - La Provincia de Chimborazo tiene gran variedad de clima y microclimas. Estos climas son: el tropical, tropical húmedo, subtropical, templado seco, templado húmedo, frío seco, frío húmedo y glacial en los nevados. Esta variedad de climas se debe a las irregularidades del territorio provincial. Las estaciones climáticas de invierno y verano tampoco son uniformes o fijas, se acepta que el verano va de mayo a noviembre, y el invierno de diciembre a abril. La temperatura ambiente tampoco es igual en toda la provincia. El Cantón Riobamba presenta 4 tipos de clima templado con estaciones marcadas: seca, lluviosa, verano y frío. Según el mapa climático del Ecuador publicado por el INAMHI en el año 2008, el subtipo climático que corresponde para el cantón Riobamba es el templado – lluvioso.(HBM, 2014, p.16)

### Localización del trabajo de titulación.

El presente trabajo de titulación de tipo técnico, se lo implementara en el cantón Riobamba, específicamente se lo realizará en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en la Facultad de Ciencias en el laboratorio de Operaciones Unitarias, específicamente en las siguientes coordenadas:

**Tabla 1-3:** Localización geográfica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

LÍMITES ESPOCH	<p><b>Norte:</b> limita con el barrio 24 de mayo y la Av. Canónigo Ramos.</p> <p><b>Sur:</b> limita con la Av. Pedro Vicente Maldonado y el Barrio de los Maestros.</p> <p><b>Este:</b> limita con la Av. 11 de Noviembre.</p> <p><b>Oeste:</b> limita con la Av. By Pass.</p>
RANGO ALTITUDINAL	Está ubicada a 2754 m.s.n.m (metros sobre el nivel del mar).
CLIMA	Temperatura Promedio 15°C
Localización coordenadas Utm	17 M 758393.95 m E UTM 9817026.05 m S
Localización coordenadas geográficas	78°40'39.24" de longitud occidental y a 1°39'14.58" de latitud sur.

**Fuente:** Instituto Nacional de Estadísticas y Censos.

**Realizado por:** Núñez Nelson, 2019



**Figura 2-3:** Localización geográfica del laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias – ESPOCH

**Fuente:** Adaptado de Google Earth (2019)

## **3.2. Ingeniería del proyecto.**

### **3.2.1 Tipo de estudio**

El presente trabajo de titulación es de carácter técnico, mediante el cual por medio de técnicas preliminares e indagación teórica-práctica se establecerá si es factible su realización, por lo que mediante un estudio analítico, descriptivo y experimental es de mucha importancia. Debido a la recolección de datos y contenidos técnicos es de tipo descriptivo, además de basarse en normas para controlar factores de estudio y datos experimentales, así como se detallan las variaciones de las variables con el objetivo de obtener el producto deseado y el método óptimo para su realización.

### **3.2.2 Métodos y Técnicas**

#### *3.2.2.1 Métodos*

Para ayudar en la realización de este tipo de proyecto técnico se realizara con un método deductivo, inductivo y experimental, estos tres métodos serán de gran ayuda para la realización del presente trabajo de titulación dado que nos proporcionara una amplia gama de información para el mismo.



a) Método inductivo

A través de este método se procede a realizar un estudio desde lo particular a lo general, esto nos da información acerca del porcentaje de componentes presentes en el combustible, garantizando el desarrollo preciso del proyecto, así mismo se da una guía mediante la caracterización del producto obtenido, estos datos vienen establecidos en la norma técnica establecida: INEN1489:2012 Productos derivados del petróleo. Diésel (Ecuador), obteniendo datos precisos para el desarrollo de este proyecto técnico.

b) Método deductivo

Para la obtención adecuada de combustible a partir de poliestireno, se debe seguir una correcta técnica para la obtención óptima del mismo utilizando el reactor de pirólisis térmica siguiendo el procedimiento adecuado, controlando las variables presentes en el proceso como son las principales la temperatura y la presión relacionándolas con el tiempo en el que se realiza el proceso de pirólisis dentro del reactor para obtener el producto con mayor rendimiento para lo cual se realizaron pruebas a diferentes temperaturas en diferentes tiempos obtenido diferentes rendimiento en cada una de las distintas pruebas.

c) Método experimental

Para realizar este método experimental se utilizan equipos tecnológicos e instrumentos adecuados para la obtención del combustible comprobando la veracidad de los datos obtenidos en las pruebas de caracterización, con el objeto de compararlas estableciendo el rango en el que se encuentra; además de la realización de las pruebas físico-químicas para corroborar los datos experimentales.

#### 3.2.2.2 Técnicas

Para la obtención del combustible se utilizaron técnicas basadas en las normas ASTM e INEN dado la importancia de las mismas para la obtención y caracterización del combustible.

El poliestireno como materia prima se la adquirió como producto de fuentes de reciclaje, que fue caracterizado mediante análisis en espectrofotómetro infrarrojo FTIR4100 JASCO. Una vez caracterizado el poliestireno se procedió a determinar la humedad de las muestras con el fin de verificar el contenido de agua presente ya que en el proceso de pirólisis hay un consumo de energía adicional.

En el combustible obtenido de la pirólisis térmica de poliestireno se realizaron análisis

cromatográficos para determinar su composición, estos análisis se realizaron en el Laboratorio Analítico “CESTA” el cual es un laboratorio que ofrece servicio de análisis químico, bioquímico, ubicado en la provincia de Chimborazo, en la ciudad de Riobamba, en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (junto a la Facultad de Ciencias), además los análisis físico-químicos se lo realizó en el laboratorio de control de la calidad de PETROECUADOR ESMERALDAS Y EL TERMINAL DE PRODUCTOS LIMPIOS RIOBAMBA. En los anexos E y F se muestran los resultados obtenidos del análisis cromatográfico y pruebas físico-químicas de la fracción líquida obtenida. Las técnicas dispuestas por la Norma NTE INEN1482:2012 para el análisis físico-químico del producto final se describen a continuación:

**Tabla 2-3: Técnicas para el análisis físico-químico del producto final**

Ensayo	Método		Descripción
Destilación	ASTM	86	En la norma ASTM D86 el producto condensado se recoge en recipientes de un determinado volumen variable según el número de puntos deseado, y se van anotando los volúmenes recogidos a la temperatura de condensación en el tope de la columna, la temperatura de condensación irá aumentando a medida que van destilando los hidrocarburos más pesados. A medida que aumenta la temperatura puede ocurrir que se produzca la descomposición térmica del crudo remanente, por esta razón se interrumpe la destilación atmosférica alrededor de los 375-380 °C
Punto de inflamación	ASTM	56	Llenar la copa con la muestra problema hasta la línea de aforo indicada. Iniciar el calentamiento, activar la agitación a 100rpm y regular la llama a 4mm. Cuando la muestra llegue a una temperatura de 30°C, hacer pasar la llama automáticamente cada 2°C hasta que se produzca la primera inflamación con una pequeña denotación. Apagar el equipo. Realizar los cálculos respectivos.
Densidad API	ASTM	1298	La densidad se expresa normalmente, por convenio, en g/cm <sup>3</sup> a la temperatura de 15 °C. Este método es aplicable para la determinación de densidades de fueloil y gasoil principalmente. Su exactitud y precisión dependerá principalmente de la calidad de los densímetros empleados, así como de las condiciones de ensayo Equipos utilizados: Juego de densímetros con certificados de contraste. Termómetro contrastado en que se pueda apreciar la décima de grado. Probeta de vidrio cuyo diámetro sea por lo menos 25 mm mayor que el del densímetro utilizado y su altura 25 mm mayor que la del densímetro que se introduce por debajo de la superficie de la muestra Para productos de viscosidad elevada, como es el caso del fueloil, se tendrá que calentar la muestra para facilitar la introducción del densímetro en el seno de la misma. La forma más correcta de hacerlo es realizar el ensayo dentro de un baño termostático ajustado a una temperatura tal, que el densímetro entre con facilidad. La probeta y el termómetro estarán a la misma temperatura que la muestra

			<p>Verter la muestra en una probeta limpia, sin salpicar y evitando la formación de burbujas de aire. Las burbujas que aparezcan se eliminan tocándolas con un papel de filtro limpio antes de introducir el densímetro.</p> <p>Colocar la probeta en un lugar exento de corrientes de aire. Introducir lentamente el densímetro en el seno de la muestra sosteniéndolo por la parte superior de la escala hasta que se aproxime a la posición de equilibrio. De esta manera se evitará el mojado de la escala emergente, que luego daría lugar a errores.</p> <p>Introducir el termómetro, evitando el contacto con el densímetro y las paredes de la probeta, y esperar hasta que se establezca la temperatura.</p> <p>Anotar la temperatura (t) y la densidad (D) como el valor en el punto en que la escala del densímetro es cortada por la superficie del líquido. Algunos fabricantes de densímetros especifican la forma correcta de tomar la lectura, bien en el plano de la superficie libre del líquido (más frecuente) o bien en el límite superior del menisco (para líquidos opacos).</p>
Numero de cetano calculado	ASTM		<p>El índice de cetano calculado es determinado a partir de la siguiente ecuación:</p> <p>Índice de cetano calculado = <math>- 420.34 + 0.016G^2 + 0.192G \log M + 65.01 (\log M)^2 - 0.0001809M^2</math>. O</p> <p>Índice de cetano calculado = <math>454.74 - 1641.416D + 774.74 D^2 - 0.554B + 97.803(\log B)^2</math></p> <p>Donde:</p> <p>G = Gravedad API determinada mediante el método de ensayo D 287, D 1298 o D4052.</p> <p>M = Temperatura media de ebullición, ° F, determinado mediante el método de ensayo D86 y corregido a presión barométrica estándar.</p> <p>D = Densidad a 15 ° C, g/ml, determinado mediante el método de ensayo D 1298 o D4052.</p> <p>B = Temperatura media de ebullición, ° C, determinado mediante el método de ensayo D86 y corregido a presión barométrica estándar.</p>
Viscosidad cinemática	ASTM	445	<p>Este Método de ensayo especifica un procedimiento para la determinación de la viscosidad cinemática, v; en productos de petróleo líquidos, tanto transparentes como opacos, mediante la medición del tiempo en que un volumen de líquido fluye bajo efecto de la gravedad a través de un viscosímetro capilar de vidrio calibrado. El rango de viscosidades cinemáticas comprendido en este Método de Ensayo es de 0.2 a 300 000 mm<sup>2</sup>/s</p> <p>Materiales y reactivos utilizados:</p> <p>Viscosímetros</p> <p>Sujetadores de Viscosímetros</p> <p>Baño a temperatura controlada</p> <p>Control de temperatura</p> <p>Dispositivo para la Medición de la Temperatura dentro del rango de 0 a 100° C</p> <p>Cronómetro</p> <p>Ácido Crómico Solución de limpieza</p> <p>Solventes volátiles de petróleo o nafta</p> <p>Solvente de secado, acetona</p> <p>Agua des ionizada o destilada</p>
Contenido de Azufre	ASTM	4294	<p>Este método cubre la determinación de azufre total en petróleo y productos de petróleo que están en una sola fase y cada líquido a condiciones normales, licuables con calor moderado o soluble en solventes de hidrocarburos. Estos materiales pueden incluir diésel, combustible de aviación,</p>

			<p>kerosene, otros aceites destilados, nafta, aceite residual, aceite lubricante básico, aceite hidráulico, aceite crudo, gasolina(todas sin plomo), Gasol, biodiesel y productos de petróleo similares.</p> <p>Los materiales utilizados son:</p> <p>Analizador de fluorescencia de rayos x de Energía dispersiva</p> <p>Fuente de excitación de rayos X</p> <p>Copa de Muestra removible equipada con membranas fílmicas transparente a los rayos X</p> <p>Detector de rayos X</p> <p>Filtros</p> <p>Acondicionamiento de la señal y manipulación electrónica de datos</p> <p>Pantalla o impresora para hacer lecturas o mostrar los resultados en % de azufre en masa y/o mg/kg de azufre</p> <p>Balanza analítica con una exactitud y resolución de 0.1 mg y capaz de pesar hasta 100g</p> <p>La muestra es colocada en el haz emitido desde un tubo de rayos X. Se mide las características de la radiación X excitada, resultante y el conteo acumulado es comparado con conteos de muestras de calibración medidas previamente ara obtener la concentración de azufre en porcentaje en masa o mg/kg. E requiere un mínimo de tres grupos de muestras de calibración para abarcar el rango de concentración: de 0.0 a 0.1% en masa, de 0.1 a 1.0% en masa, y de 1.0 a 5.0% en masa de azufre</p>
Agua y sedimento	ASTM	1796	<p>Este método de ensayo cubre la prueba de laboratorio para la determinación de agua y sedimentos en los aceites combustibles mediante el uso de la centrifuga, método en el rango de 0 a 30% de volumen</p> <p>Los valores indicados en unidades del Sistema Internacional (SI) deben considerarse como el estándar. Los valores entre paréntesis son solo para fines informativos</p>
Poder Calórico Superior	ASTM	240	<p>Se basa en la combustión de una cantidad conocida de combustible en atmósfera de oxígeno, en una bomba calorimétrica, en condiciones adiabáticas normalizadas. El PCS se calcula a partir de la elevación de la temperatura del agua del vaso calorimétrico, del equivalente calorífico del calorímetro, y de la aplicación de las correcciones termoquímicas y otras. El poder calorífico así determinado es el poder calorífico superior a volumen constante.</p> <p>Bomba calorimétrica marca IKA Werke modelo C5003. Consta de un controlador con celda de medición y un sistema de refrigeración. El sistema puede trabajar en modo adiabático, isoperibólico o dinámico de forma totalmente automatizada, permitiendo el llenado y evacuación de oxígeno de forma automática.</p> <p>El sistema permite la medición y el cálculo del poder calorífico según las normas: DIN51900, ISO 1928, ASTM D240, ASTM D5865, ASTM D1989, ASTM D5468, ASTM E711. También permite calcular el valor calorífico según las normas DIN 51900, ASTM D240, ASTM D4809, ASTM D5865, ASTM D1989, ASTM D5468, ASTM E711.</p>

Fuente: ASTM INSTITUTE

Realizado por: Núñez Nelson, 2019

### 3.2.3 Selección de la materia prima.

La materia prima (poliestireno) seleccionada cumple con el análisis del espectrofotómetro de infrarrojo dando a conocer que la materia prima corresponde a la estructura de poliestireno, dando los picos en los cuales este se encuentra en un análisis IR.

### 3.2.4 Procedimiento a nivel del laboratorio

El procedimiento se basa en la obtención de resultados obtenidos a nivel de laboratorio, los cuales se basan en el procedimiento a seguir en un reactor de pirólisis térmica para la obtención de combustible a partir de polímeros.

#### 3.2.4.1 Parte experimental

Sustancias y reactivos.

- 100 g de poliestireno

Materiales y equipos

- Reactor de pirólisis tipo batch
- Erlenmeyer de 250 ml
- Condensador
- Refrigerante
- Acoples de vidrio
- Balanza
- Vaso de precipitación de 250ml
- Vaso de precipitación de 500ml
- Cronómetro

Procedimiento

- Verificar conexión a toma de 220V
- Pesar 100 gramos de poliestireno e introducirlos en el interior del vaso de manera uniforme
- Sellar y verificar que la tapa del reactor se encuentre correctamente colocada, de tal manera que no existan fugas en el proceso utilizando el sistema de bridas
- Conectar la línea de nitrógeno a la entrada del reactor esto para crear una atmosfera neutra, se

lo debe hacer con sumo cuidado hasta llegar a una presión de 40 PSI, esperar por 5 minutos para de esta manera verificar que no existan fugas y así crear una atmosfera neutra, posteriormente se libera el nitrógeno por la válvula de alivio del reactor, hasta llegar a una presión de 0 PSI

- Encender el reactor verificando la temperatura ambiente y que el panel de control de la temperatura este en perfecto estado
- Definir la temperatura a 100°C, e ir verificando el incremento de la misma cada 30 segundos y a su vez el incremento de la presión hasta llegar a dicha temperatura , después de que el equipo este estabilizado, proceder a colocar a 200°C, de la misma manera una vez alcanzada la temperatura definida esperar a que se estabilice el equipo y colocar a 250°C, a partir de esta temperatura procedemos a subir de 50°C en 50°C por motivos de seguridad ya que estas son las temperaturas criticas del proceso
- Una vez que la presión supere o iguale los 60 PSI se libera el gas generado, por la válvula de salida del reactor para lo cual se conecta una manguera de alta presión a un condensador donde se usara como un sistema de enfriamiento agua de tal forma que no se genere contaminación.
- La función principal del condensador es transformar los gases que salen del reactor en estado líquido, por medio de un refrigerante que en nuestro caso será agua a una temperatura de 11,5°C. En el proceso existirán gases que no se condensaran y mediante diferencia de densidades el vapor va a quedar en la parte superior, el líquido o producto en la parte intermedia, mientras que el agua quedará en la parte inferior.
- Una vez llegada a la temperatura deseada (425°C), apagar el equipo y dejar que se enfríe para posteriormente abrir el mismo
- Una vez que el equipo se enfríe se procederá a pesar el residuo sólido que se queda en el vaso del reactor.
- Realizar los cálculos necesarios
- Limpiar el equipo.

### **3.2.5 Variables del proceso**

Las principales variables a tomar en consideración en el proceso de obtención de combustible a partir de la pirólisis térmica de poliestireno son:

- Temperatura
- Tiempo de residencia
- Presión

### *3.2.5.1 Temperatura.*

La temperatura es la variable más importante dentro del proceso de pirólisis térmica, debido a que estará en función a los productos que se desea obtener, conociendo que a una temperatura mayor las fracciones obtenidas serán líquidas y a temperaturas menores se obtendrá en mayor cantidad fracciones gaseosas.

Esta variable determina la velocidad de descomposición térmica, así como la estabilidad de las materias primas que ingresan, y de igual manera influye en los productos obtenidos. Las elevadas temperaturas, mayores a 600 °C, dan lugar a pequeñas moléculas gaseosas simples; mientras que los productos líquidos más viscosos, se producen a temperaturas menores a 400 °C (temperaturas bajas) y a presiones más altas. En la mayoría de los plásticos el proceso de pirólisis puede iniciar antes de los 300 °C, aunque para algunas resinas termo sensibles el proceso puede iniciar antes, también la presencia de aditivos (estabilizantes, plastificantes y pigmentos) influye en el inicio de la reacción. Por lo general, se selecciona una temperatura media entre 400°C a 500°C para el proceso (Espinoza & Naranjo, 2014).

### *3.2.5.2 Tiempo de residencia*

Los productos que se aspira obtener están relacionados con el tiempo de residencia del plástico dentro del proceso de pirólisis, así también esta variable nos ayuda a determinar el tipo de reactor que se debe utilizar para que el proceso se lleve con normalidad y obtener los productos deseados, esto debido a que el tiempo que el polímero se encuentra en el reactor puede influenciar de manera directa o indirecta en la obtención del producto deseado.

La presión es una variable directamente proporcional a la temperatura en el proceso de pirólisis térmica, así, al aumentar la temperatura, la presión en el reactor se incrementará por lo cual se obtendrá una mayor cantidad de productos. Este parámetro no influye en el resultado obtenido dado que al aumentar la presión el rendimiento es el mismo, ésta se la controla por seguridad del equipo al estar diseñado para soportar presiones de hasta 120PSI y para no causar ningún daño al equipo se realiza su control.

## **3.3. Proceso de producción**

En el proceso de obtención de combustible por medio de la pirólisis térmica es muy importante el funcionamiento del reactor utilizado ya que de este depende en su gran mayoría el producto a más del trabajo manual que cumple una función muy importante dentro del proceso.

### **3.3.1. Materia prima**

El poliestireno es un polímero artificial que posee propiedades como es la resistencia al calor, ligereza, alta resistencia y una durabilidad razonable, se lo utiliza normalmente para envasado de alimentos además de requerir bajas temperaturas como materia prima para pirólisis ya que este produce aceites menos viscosos en comparación a PP y PE (Miandad *et al.*, 2016).

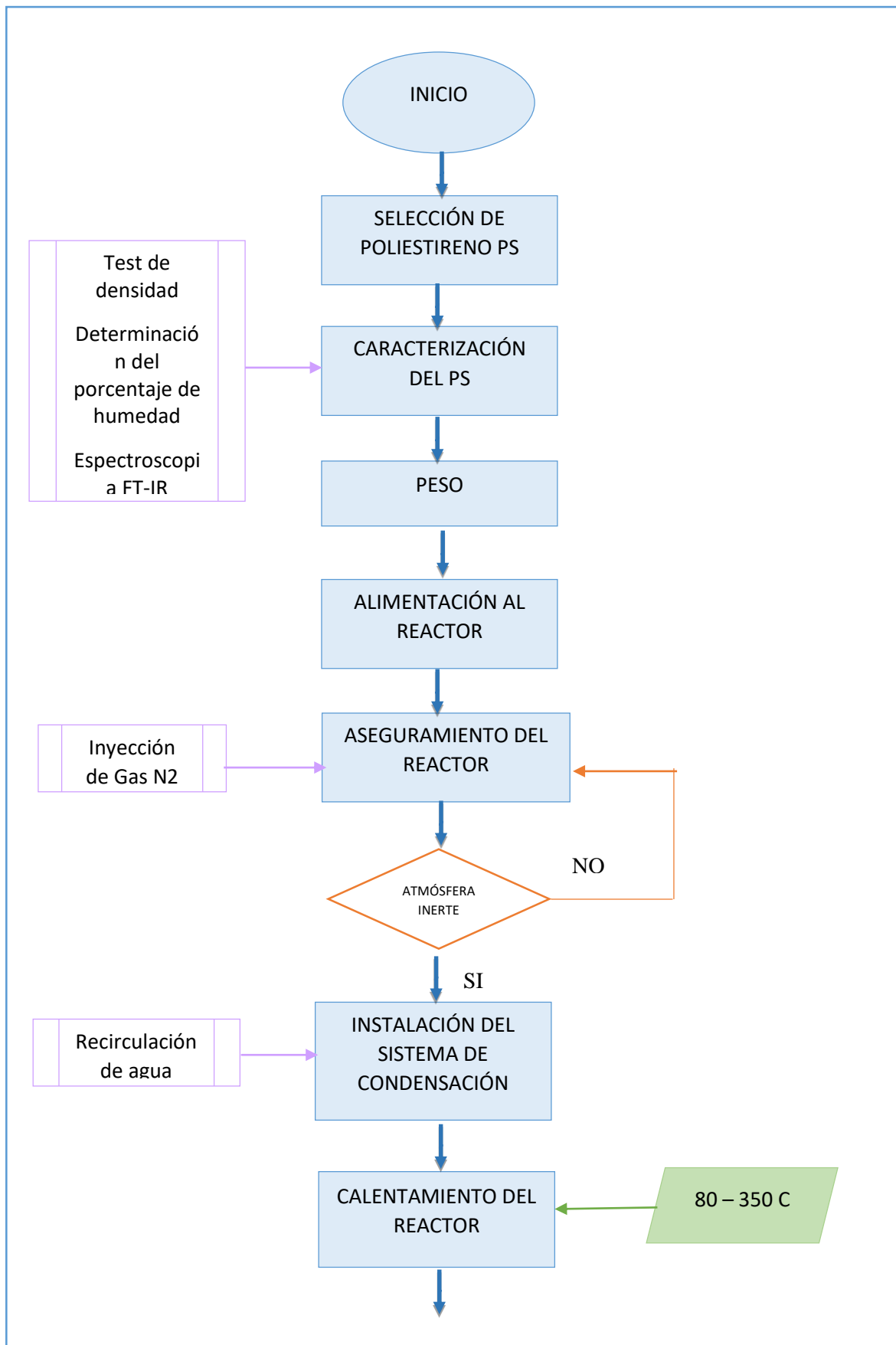
El poliestireno (PS) básicamente es un polímero termoplástico que se obtiene de la polimerización del estireno. El material termoplástico a temperaturas relativamente altas se vuelve deformable o flexible, se derrite cuando se calienta y se endurece en un estado de transición vítrea cuando se enfría lo suficiente. Hoy en día el poliestireno es el cuarto plástico más utilizado a nivel mundial detrás del polietileno y polipropileno. Dentro de la clasificación existen cuatro tipos de poliestireno: el PS cristal, PS de alto impacto (HIPS), PS expandido, PS extrusionado.

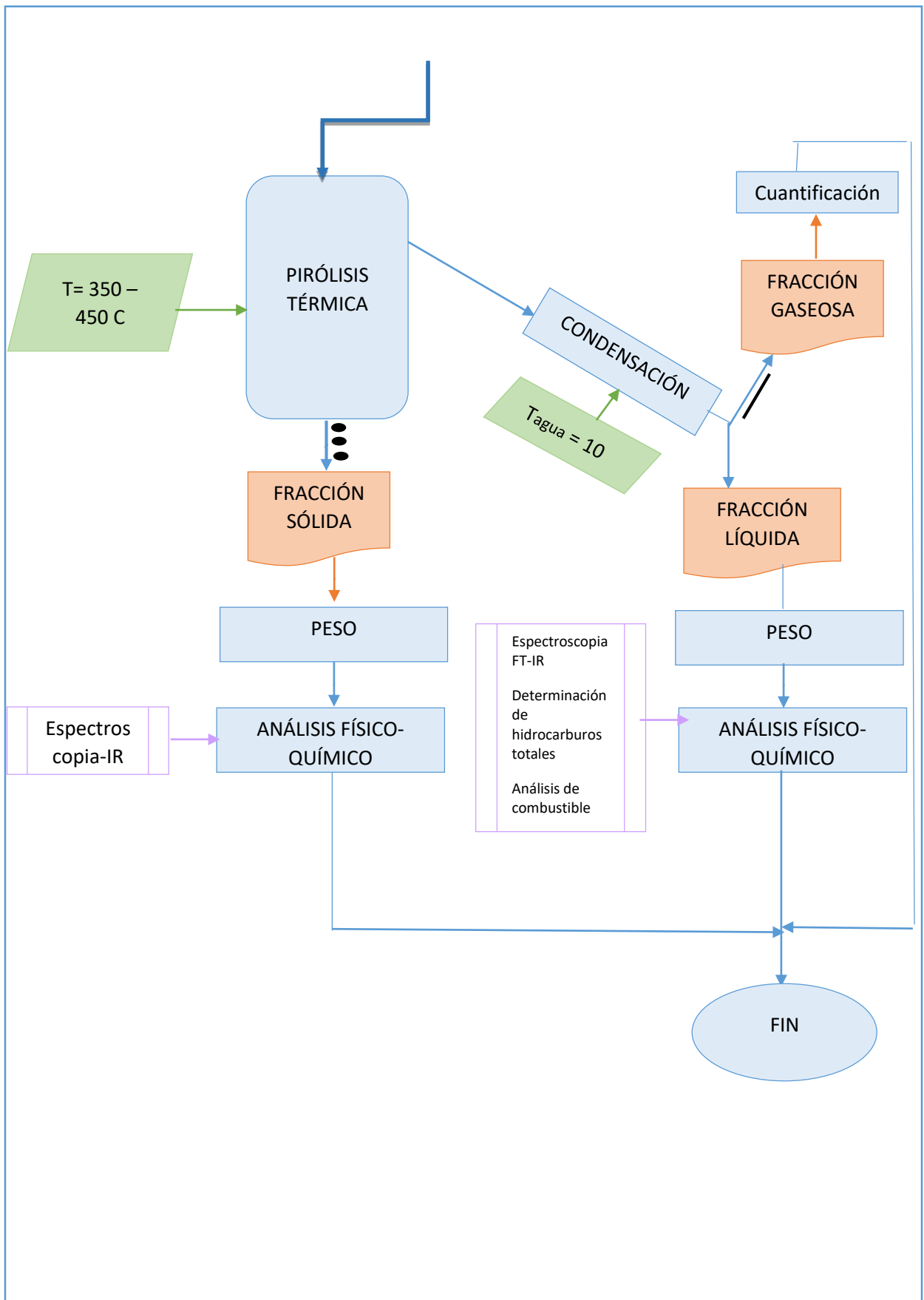
Para el presente trabajo se utilizó el HIPS el cual es reciclable así como otros termoplásticos (PS); un ejemplo de este tipo de plástico son los envases de yogurt cuyo numerado se encuentra el 6, además de envases para alimentos son ejemplos de este tipo de plástico. (Ethna and Ocles, 2017, p. 14,15,16)

Las principales aplicaciones que se le da al PS es para empaques de yogurt, crema, mantequilla, empaques de medicamentos, entre otros; además de esto el PS al ser laminado con espuma se lo utiliza para platos, vasos, mejorando su estética por esto y más es uno de los plásticos de mayor utilidad a nivel mundial.



### 3.3.2. Diagrama del Proceso





**Gráfico 1-3:** Diagrama de proceso para la obtención combustible a partir de la pirólisis térmica de PS  
 Realizado por: Núñez Nelson, 2019

### 3.4. Análisis de Materia prima

#### Análisis de Humedad

Este análisis se lo realizó con el fin de poder determinar la cantidad de agua presente en el plástico que va a ser objeto de estudio, porque previamente se somete a un proceso de lavado y secado, entonces el análisis no debe ser mayor a 5% de humedad.

En la materia prima obtenida para el proceso se encontró con un porcentaje de 0,040% de humedad dando un valor aceptable para el proceso de pirólisis.

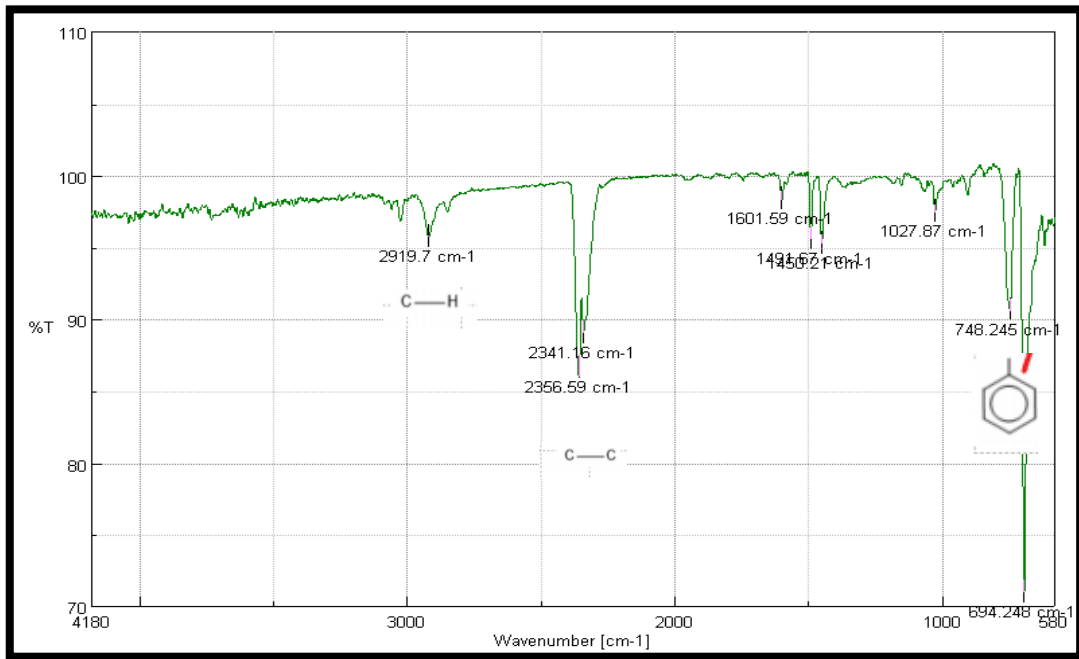


**Figura 3-3.** Análisis de humedad de la muestra de poliestireno  
Realizado por: Núñez Nelson, 2019

#### Análisis FTIR

El análisis FTIR se lo utiliza para la ciencia de los polímeros para determinar la estructura molecular con características de absorción de iluminación infrarroja y determinar el tipo de plástico y los posibles compuestos aditivos a su estructura. Mediante el análisis FT-IR realizado a la materia prima en el espectro se observa 3 grupos de bandas pertenecientes a los múltiples movimientos de tensión de los enlaces C-H a 2919,7cm<sup>-1</sup>, el enlace C-C entre 1400 y 1600cm<sup>-1</sup> de anillo aromático y

movimiento de flexión de  $-CH_2$  y tensiones del anillo aromático con valores  $748,245\text{cm}^{-1}$ , determinando así que la materia prima en si corresponde a los grupos funcionales presentes en el poliestireno.



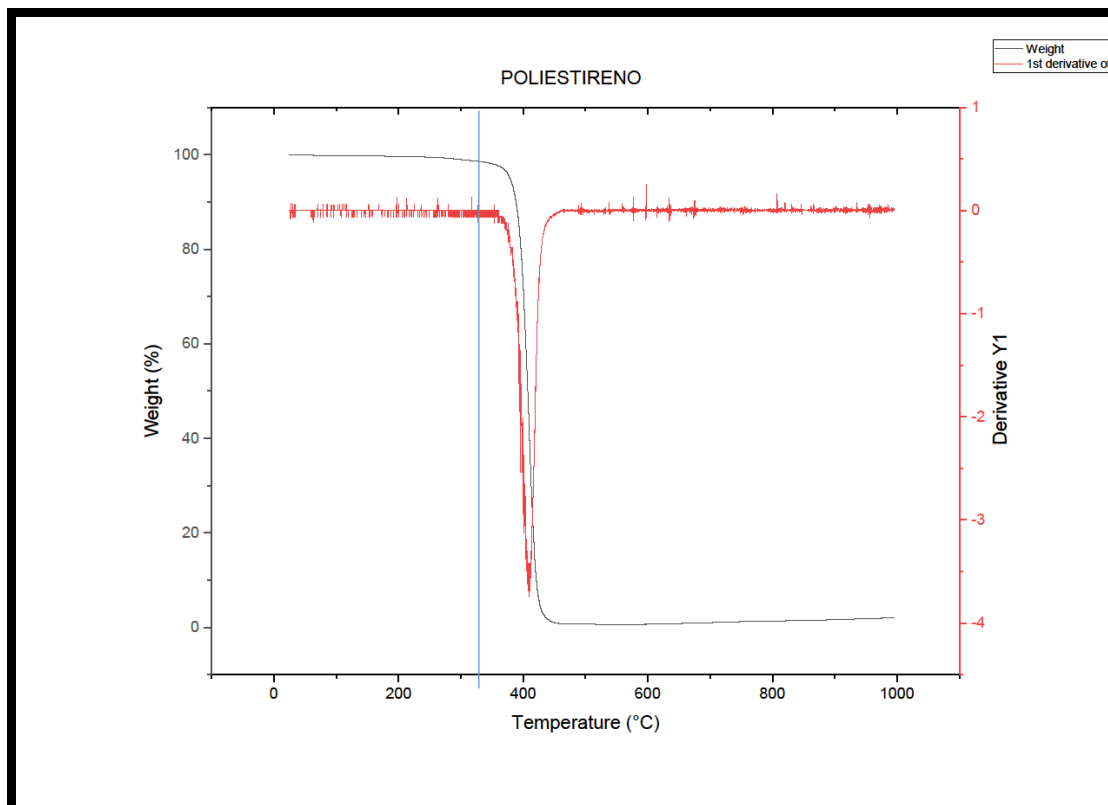
**Gráfico 2-3.** Análisis FTIR de la materia prima (PS)

Fuente: Laboratorio Análisis Instrumental ESPOCH

Realizado por: Núñez Nelson, 2019

### Análisis TGA

El TGA o análisis termogravimétrico se lo realiza para determinar el rango de temperatura en el cual la materia prima (PS) se va a degradar y así tener un valor de referencia al cual se realizara el proceso de pirólisis.



**Figura 4-3.** Análisis TGA de la materia prima (PS)

Realizado por: Núñez Nelson, 2019

Mediante el reciclaje químico se puede obtener la degradación del poliestireno en distintos materiales derivados del petróleo, esto se realiza en un rango de temperatura que oscila entre los 300-450°C en una atmósfera con presencia de nitrógeno, clorofluorocarbono, propano o similares, con catalizadores óxidos ácidos o básicos (Saltos, et al, 2015).

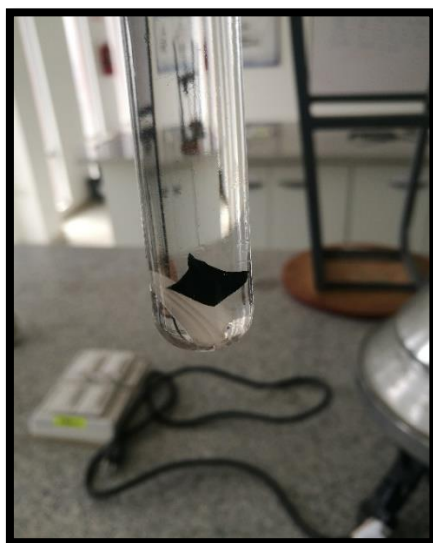
Además que de acuerdo al termograma echo por Saltos, et.al, (2015) nos indica que la descomposición del poliestireno utilizado para su trabajo registra una pérdida de peso a los 276,44°C mientras que la pérdida máxima de peso se da a una temperatura de 430,02°C.

De acuerdo a los análisis hechos anteriormente nos encontramos con que el análisis termogravimétrico realizado a la materia prima (PS) se puede observar que la curva demuestra un pico simple y bien definido para el polímero dando un rango de temperatura en la cual el PS inicia a degradarse alrededor de los 350°C continuando hasta una temperatura de 450°C aproximadamente.

#### **Test de agua:**

Este proceso consiste en colocar 15ml de agua e un tubo de ensayo para posteriormente introducir los gránulos de la resina en el mismo.

Sumergir cada uno de los gránulos con una varilla de vidrio para eliminar cualquier burbuja de aire adherida a la superficie. Finalmente se observa si las resinas se hunden o no para su posterior uso en una diferente prueba; si la muestra se hunde procedemos a realizar la prueba de lámina de cobre



**Figura 5-3.** Prueba de agua de la materia prima (PS)  
Realizado por: Núñez Nelson, 2019

### Test de alambre de cobre

Para ello se procede con un pedazo de alambre de alrededor de 5cm o más, un extremo del alambre de cobre se lo somete a temperatura en una llama hasta que este caliente y con ese extremo tocar a muestra de plástico y una pequeña cantidad se derrite en el cable.

Al tener la muestra de plástico derretida en el alambre se lo lleva a una llama, al realizar esto se producirá una llama de color amarillo-naranja con lo cual se determina que es PS en caso de que la llama se vuelva de color verde se trata de PVC



**Figura 6-3.** Prueba de alambre de cobre de la materia prima (PS)  
Realizado por: Núñez Nelson, 2019

## Test de acetona

La prueba de acetona se realiza a la muestra de plástico en la que la llama en el test de alambre de cobre sea de color anaranjado caso contrario se procederá a realizar otro tipo de análisis.

Se coloca 10ml de acetona en un vaso de precipitación de 50ml. Se procede a colocar la muestra de plástico en la acetona durante 20 segundos, luego se lo retira y se comprueba si el plástico es blando y pegajoso si es así se comprueba que el plástico utilizado se trata de poliestireno para corroborar esta prueba se lo deja al plástico en acetona durante 5min con agitación con lo que el PS se disolverá en la acetona.



**Figura 7-3.** Prueba de acetona de la materia prima (PS)  
Realizado por: Núñez Nelson, 2019

### 3.5. Valoración de la pirólisis a diferentes temperaturas

#### 3.5.1. *Efecto de la temperatura con un tiempo de residencia de 5 minutos en la obtención de fracción líquida*

Mediante una experimentación se pudo obtener los productos de pirólisis a diferentes temperaturas en las cuales se procedió a realizar el siguiente proceso experimental para determinar la temperatura a la cual el proceso tiene un mayor rendimiento

Mediante el análisis experimental para determinar el tiempo y temperatura óptima se obtuvo los siguientes resultados en un tiempo de residencia de 5 y 10 minutos respectivamente una vez alcanzada la temperatura deseada, así se obtuvo los siguientes resultados a dichas temperaturas:

**Tabla 3-3. Análisis experimental para determinar la temperatura óptima del proceso**

T (°C)	Tiempo (min)	LIQUIDO		SOLIDO		Gas
		Peso(g)	%	Peso(g)	%	%
375	5	73,0783	73,0783	3,37	3,37	23,5517
		74,0009	74,0009	0,9231	0,9231	25,0760
		74,2988	74,2988	1,2403	1,2403	24,4609
	10	76,1785	76,1785	0,6606	0,6606	23,1609
		76,8828	76,8828	1,0005	1,0005	22,1167
		76,6230	76,623	1,0439	1,0439	22,3331
400	5	80,0176	80,0176	1,0339	1,0339	18,9485
		81,6425	81,6425	0,2744	0,2744	18,0831
		80,1547	80,1547	0,3752	0,3752	19,4701
	10	81,2868	81,2868	0,9646	0,9646	17,7486
		81,2995	81,2995	1,1701	1,1701	17,5304
		81,6545	81,6545	1,3574	1,3574	16,9881
425	5	79,2615	79,2615	0,4069	0,4069	20,3316
		78,4351	78,4351	0,9027	0,9027	20,6622
		77,3571	77,3571	0,6059	0,6059	22,0370
	10	79,0895	79,0895	2,7589	2,7589	18,1516
		79,0217	79,0217	2,1935	2,1935	18,7848
		79,1386	79,1386	1,8948	1,8948	18,9666
450	5	80,9533	80,9533	2,1475	2,1475	16,8992
		80,9192	80,9192	2,3266	2,3266	16,7542
		80,0034	80,0034	1,9942	1,9942	18,0024
	10	78,5176	78,5176	2,527	2,527	18,95544
		79,4752	79,4752	2,2787	2,2787	18,24611
		79,8606	79,8606	2,1054	2,1054	18,03403

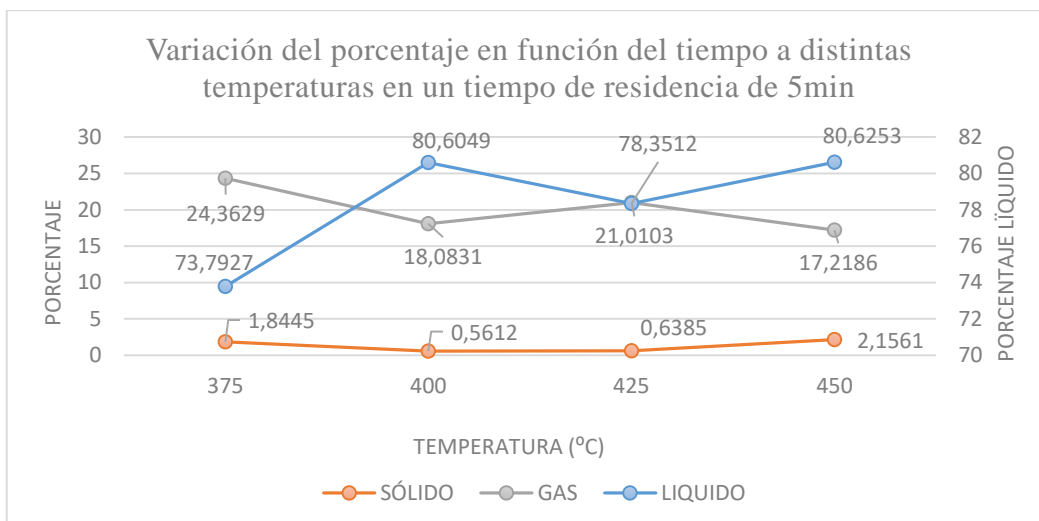
Realizado por: Núñez Nelson, 2019

**Tabla 4.3. Tabla con los promedios de % líquido, sólido y gas obtenido a diferentes temperaturas en un tiempo de residencia de 5 minutos**

T (°C)	LIQUIDO		SOLIDO		GAS	
	Peso(g)	%	Peso(g)	%	Peso	%
<b>375</b>	73,7927	73,7927	1,8445	1,8445	24,3628	24,3628
<b>400</b>	80,6049	80,6049	0,5612	0,5612	18,8339	18,8339
<b>425</b>	78,3512	78,3512	0,6385	0,6385	21,0103	21,0103
<b>450</b>	73,0783	73,0783	3,37	3,37	23,5517	23,5517

Realizado por: Núñez Nelson, 2019





**Gráfico 3-3:** Porcentaje vs temperatura de las fracciones obtenidas en el proceso de pirólisis en un tiempo de residencia de 5min

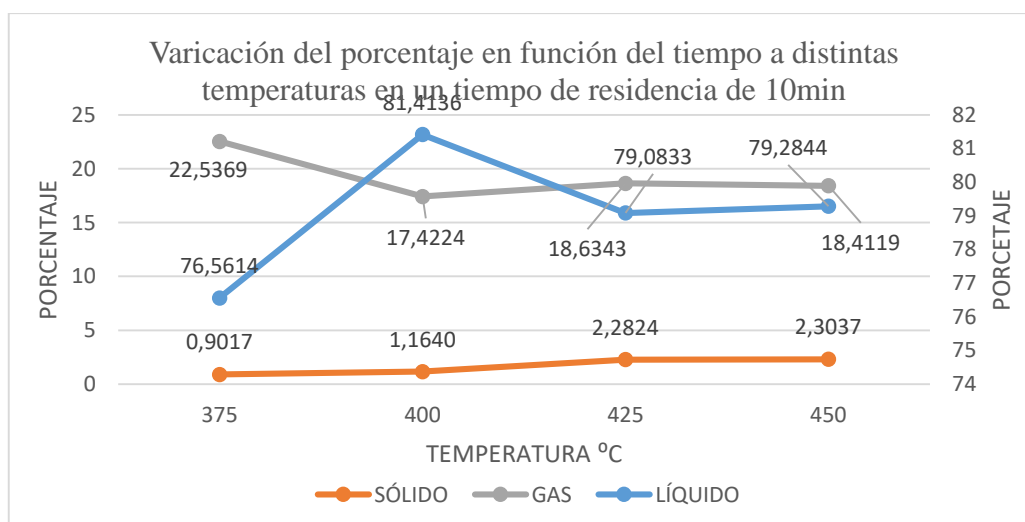
Realizado por: Núñez Nelson, 2019

3.5.2. Efectos de la temperatura y presión a distintas temperaturas con un tiempo de residencia de 10 minutos al llegar a la temperatura requerida

**Tabla 5.3.** Tabla con los promedios de % de líquido, sólido y gas obtenido a diferentes temperaturas en un tiempo de residencia de 10 minutos

T (°C)	LIQUIDO		SOLIDO		GAS	
	Peso(g)	%	Peso(g)	%	Peso	%
375	76,5614	76,5614	0,9646	0,9646	22,5369	22,5369
400	81,4136	81,4136	1,1640	1,1640	17,4224	17,4224
425	79,0833	79,0833	2,2824	2,2824	18,6343	18,6343
450	79,2844	79,2844	2,3037	2,3037	18,4119	18,4119

Realizado por: Núñez Nelson, 2019



**Gráfico 4-3:** Porcentaje vs temperatura de las fracciones obtenidas en el proceso de pirólisis en un tiempo de residencia de 10min

Realizado por: Núñez Nelson, 2019

### 3.6. Cálculos de Ingeniería

#### 3.6.1. Datos adicionales.

Densidad a 15 °C para la fracción líquida obtenida de la pirólisis

$$\rho = 934,7 \frac{mg}{kg}$$

Grados API a 60 °F para la fracción líquida obtenida de la pirólisis

$$\text{Grados API} = 19,8 \text{ } ^\circ\text{API}$$

Temperaturas de destilación experimental

**Tabla 6.3.** Temperatura de destilación experimental

Volumen en porcentaje %	Temperatura experimental °C
10	100
20	119
30	121
40	124
50	127
60	131
70	136
80	170
90	309

**Fuente:** Laboratorio de control de calidad PETROCUAADOR  
**Realizado por:** Núñez Nelson, 2019

#### 3.6.2. Cálculos para determinar la temperatura de inflamación y de destilación corregidas.

La temperatura a la que la fracción líquida se inflama es a 22 °C para lo cual se debe realizar la corrección para la provincia de Chimborazo.

$$\text{Punto de inflamación} = 22 + 8 = 30 \text{ C}$$

Se debe corregir las lecturas de temperaturas a una presión de 101.3 kPa (760 mm Hg). Para obtener la corrección aplicable a cada lectura utilizamos la ecuación de Sydney Young

$$C_c = 0.0009 (101.3 - P_k) (273 + t_c) \quad (\text{Ec. 1})$$

$$C_c = 0.00012 (760 - P) (273 + t_c) \quad (\text{Ec. 2})$$

Para temperaturas Fahrenheit:

$$C_c = 0.00012 (760 - P) (460 + t_f) \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

$t_c$  = lecturas de temperaturas observadas en °C

$t_f$  = lecturas de temperaturas observadas en °F

$C_c$  y  $C_f$

= Correcciones para ser adicionadas algebraicamente, a las lecturas de temperaturas observadas.

$P_k$  = Presión barométrica, predominando la hora y el lugar del ensayo, KPa.

$P$  = Presión barométrica, predominando la hora y el lugar de ensayo, 542mm Hg.

Temperatura de destilación corregida:

$$T = t_c + C_c$$

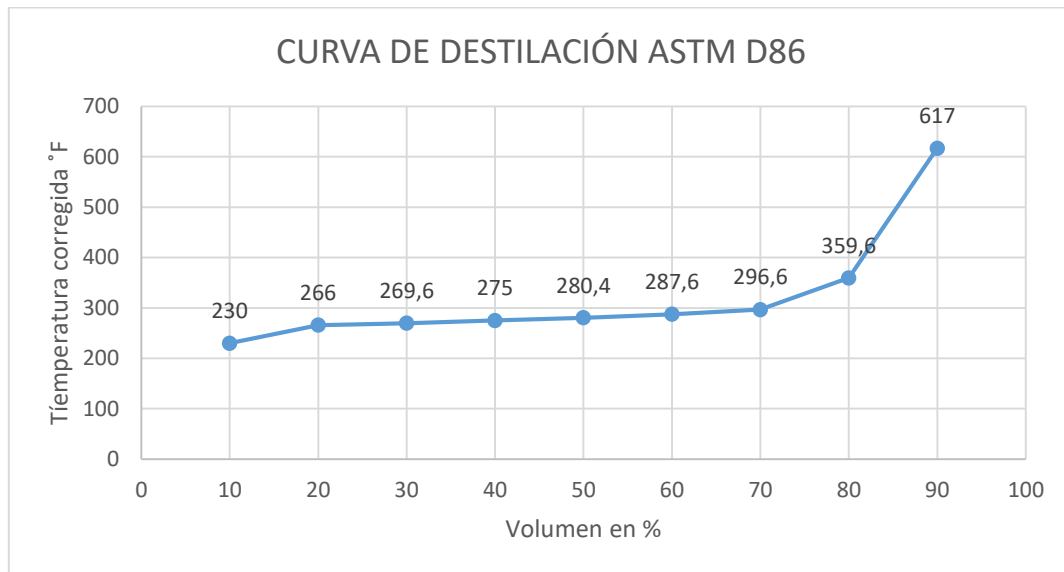
**Tabla 7.3.** Temperatura de destilación corregida

Volumen en porcentaje %	Temperatura experimental (°C)	Temperaturas corregidas (°C)	Temperatura corregida (°F)
10	100	109,8	230
20	119	130	266
30	121	132	269,6
40	124	135	275
50	127	138	280,4
60	131	142	287,6
70	136	147	296,6
80	170	182	359,5
90	309	325	617

**Fuente:** Laboratorio de control de calidad PETROCUAADOR

**Realizado por:** Núñez Nelson, 2019

Curva de destilación ASTM D86



**Gráfico 5-3:** Curva de destilación ASTM

Realizado por: Núñez Nelson, 2019

3.6.3. Cálculos para determinar el índice de cetano calculado.

Índice de cetano calculado

$$= -420.34 + 0.16G^2 + 0.192G \log M + 65.01 (\log M)^2 - 0.0001809M^2.$$

Índice de cetano calculado

$$= 454.74 - 1641.416D + 774.74 D^2 - 0.554B + 97.803(\log B)^2$$

Donde:

$G$  = Gravedad API determinada mediante el método de ensayo D 287, D 1298 o D4052.

$M$  = Temperatura media de ebullición, °F, determinado mediante el método de ensayo D86 y corregido a presión barométrica estándar.

$D$  = Densidad a 15 °C, g

/ml, determinado mediante el método de ensayo D 1298 o D4052.

$B$  = Temperatura media de ebullición, °C, determinado mediante el método de ensayo D86 y corregido a presión barométrica estándar

$$\text{Índice de Cetano calculado} = 20.6$$

### 3.7. Resultados químicos de los componentes que contienen los productos líquidos obtenidos

Para determinar los componentes presentes en las fracciones líquidas obtenidas de la pirólisis térmica de poliestireno se realizó un análisis cromatográfico en el laboratorio CESTTA determinando los hidrocarburos totales y los diferentes grupos presentes y las fracciones que en ella se encuentra dando como resultados los siguientes análisis:

#### *Hidrocarburos totales de la fracción líquida a 5min*

**Tabla 8.3. Tabla de hidrocarburos de la fracción líquida obtenida a diferentes temperaturas en un tiempo de residencia de 5min**

T (°C)	t(min)	Hidrocarburos Totales	(C6-C12)	(>C12-C20)	(>C20-C28)	(>C28-C40)
375	5	89,69	29,7	42,37	13,01	4,62
400	5	88,55	29,68	37,87	15,05	5,95
425	5	87,91	30,65	37,07	14,64	5,55
450	5	79,46	30,17	29,02	14,68	5,58

Fuente: Laboratorio CESTA

Realizado por: Núñez Nelson, 2019

#### *Hidrocarburos totales de la fracción líquida a 10min*

**Tabla 9.3. Tabla de hidrocarburos de la fracción líquida obtenida a diferentes temperaturas en un tiempo de residencia de 10min**

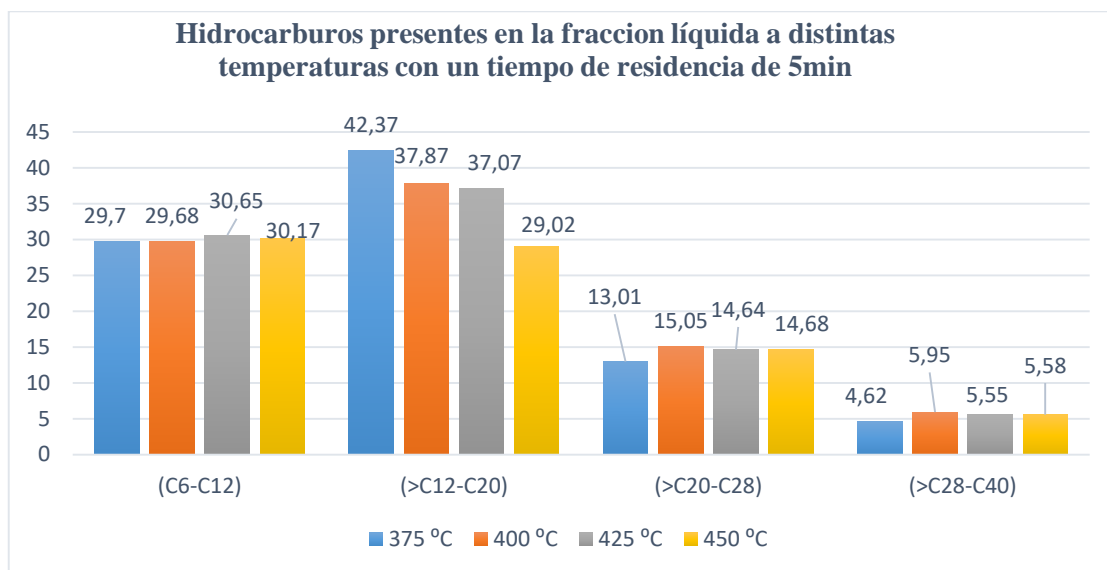
T (°C)	t(min)	Hidrocarburos Totales (%)	(C6-C12)	(>C12-C20)	(>C20-C28)	(>C28-C40)
375	10	75,27	26,57	32,12	11,81	4,77
400	10	97,56	34,29	41,02	15,92	6,33
425	10	78,13	30,17	28,53	14,19	5,24
450	10	79,02	29,27	22,02	22,73	4,99

Fuente: Laboratorio CESTA

Realizado por: Núñez Nelson, 2019

Dentro de los resultados obtenidos se puede observar que el rango de carbonos C12-C20 corresponden a los establecidos para combustibles tipo diésel así tenemos para diésel N#1 el cual va desde C<sub>8</sub> hasta C<sub>17</sub> con la mayoría de carbonos dentro de un rango de C<sub>10</sub> hasta C<sub>14</sub>; para diésel N#2 tenemos el rango de carbonos que van desde C<sub>10</sub> hasta C<sub>26</sub>, con la mayoría de carbonos dentro del rango de C<sub>10</sub> a C<sub>20</sub> por lo cual la fracción líquida obtenida se la puede tratar como un combustible tipo diésel.

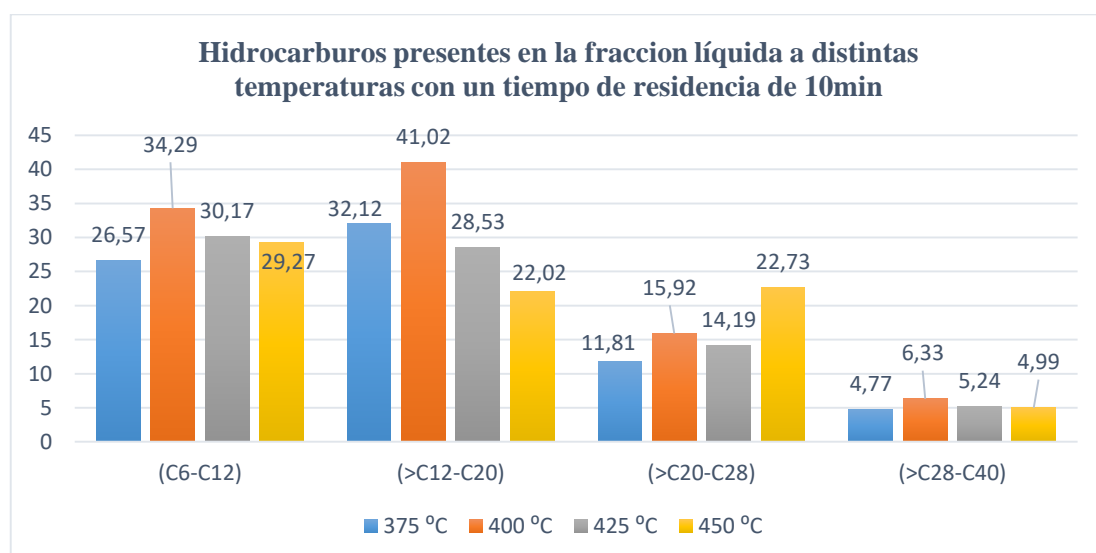
### 3.8. Comparación de los hidrocarburos presentes en la fracción líquida



**Gráfico 6-3:** Diagrama % vs hidrocarburos presentes en la fracción líquida obtenida de la pirólisis térmica de poliestireno

Realizado por: Núñez Nelson, 2019

Realizando la comparación de los hidrocarburos presentes se determina que a una temperatura 375<sup>o</sup>C posee un 42,37% de hidrocarburos (>C12-C20) representando la mayor cantidad de hidrocarburos presentes pero esta temperatura al no ofrecer un rendimiento óptimo se la descarta, las temperaturas que no tienen una marcada diferencia son a 400 y 425<sup>o</sup>C dando resultados de 37,87 y 37,07% de hidrocarburos respectivamente.



**Gráfico 7-3:** Diagrama % vs hidrocarburos presentes en la fracción líquida obtenida de la pirólisis térmica de poliestireno

Realizado por: Núñez Nelson, 2019

### 3.9. Análisis estadístico para determinar la temperatura óptima y tiempo de residencia

Se realizó un ANOVA, con el método de Tukey con el fin de determinar las variables significativas que intervienen en el proceso evaluando la importancia de uno o más factores; dicho efecto se realizó para la temperatura y el tiempo. De las cuales las relaciones significativas son líquido-temperatura e hidrocarburos-temperatura (ANEXO G), dando un resultado significativo el efecto de la temperatura mientras que el tiempo no lo es, así se demuestra que por cada unidad que aumenta la temperatura el porcentaje de líquido aumenta 4.8.

Evaluando un ajuste cuadrático para ver hasta qué punto aporta favorablemente la temperatura al porcentaje líquido, los resultados indican que la temperatura que favorece al porcentaje líquido es hasta 425.5 grados, sobrepasando esta temperatura el aporte es negativo ya que no influye positivamente en el porcentaje líquido ya que al aumentar la temperatura esta no influye en la obtención de una mayor cantidad de líquido, identificando así la temperatura óptima del proceso la cual es de 425 °C.

Una vez determinado que el tiempo no es un factor determinante en la obtención de un mayor porcentaje líquido en el proceso, se determinan las relaciones no significativas las cuales son líquido-tiempo y hidrocarburos-tiempo; para las cuales mientras más repeticiones se realicen un mejor resultado obtendremos del análisis estadístico, conociendo que los tiempos no son relevantes por lo que las temperaturas son las más influyentes en la obtención de una fracción líquida de la pirólisis de poliestireno. (Ver anexo G)

### 3.10. Resultados de las propiedades físico-químicas de la fracción líquida obtenida de la pirólisis en el ensayo más óptimo

**Tabla 10-3.** Resultados de los análisis físico-químicos

Ensayo	Método		Resultado	Unidad de medida
Destilación 90%	ASTM	86	325	°C
Destilación 50%	ASTM	86	132	°C
Punto de inflamación	ASTM	56	30	°C
Densidad relativa a 15.6 C	ASTM	1298	0,9352	-
Densidad a 15.0 C	ASTM	1298	934,7	mg/kg
°API a 60 °F	ASTM	1298	19,8	°API

Índice de cetano calculado	ASTM	4737	20,6	-
Viscosidad cinemática	ASTM	445	1,026	mm <sup>2</sup> /s
Contenido de Azufre	ASTM	4294	112	mg/kg
Contenido de Agua y Sedimento	ASTM	1796	0,50	%v
Poder calórico superior	ASTM	4809	48,556	mJ/kg

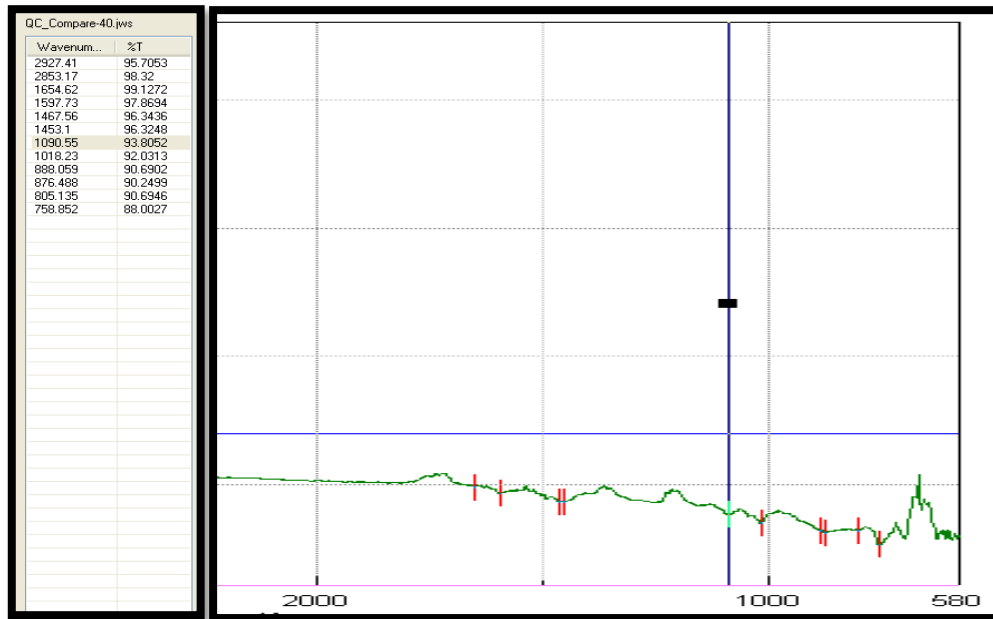
Fuente: Laboratorio de control de calidad PETROCUAADOR

Realizado por: Núñez Nelson, 2019

### 3.11. Resultados de espectroscopia infrarroja de los residuos de la pirólisis

#### 3.11.1 Espectro IR de los residuos sólidos de la pirólisis a 5min

➤ Temperatura a 375 °C



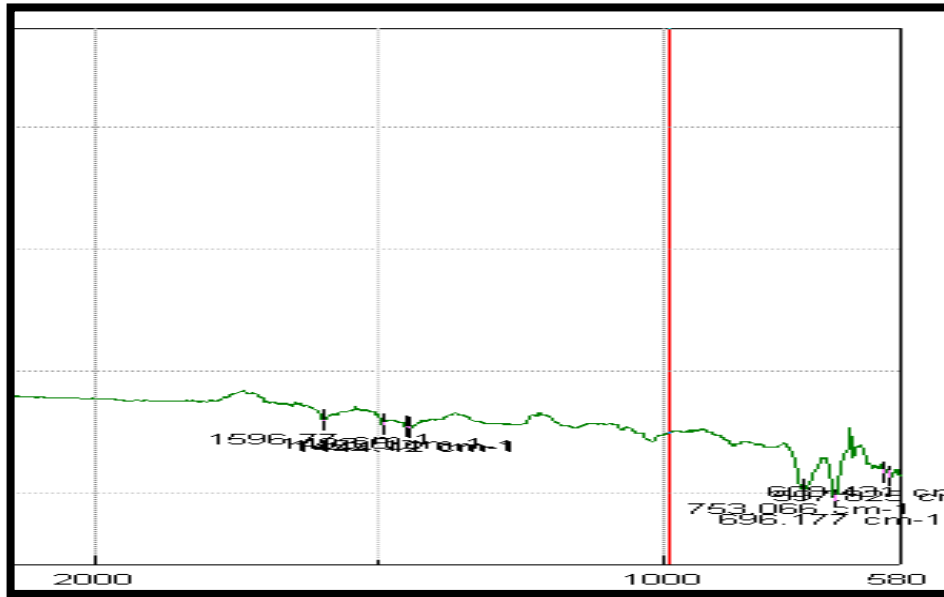
**Gráfico 8-3.** Análisis FTIR de la fracción sólida obtenida de la pirólisis térmica a 375 °C con un tiempo de residencia de 5min

Fuente: Laboratorio Análisis Instrumental ESPOCH

Realizado por: Núñez Nelson, 2019

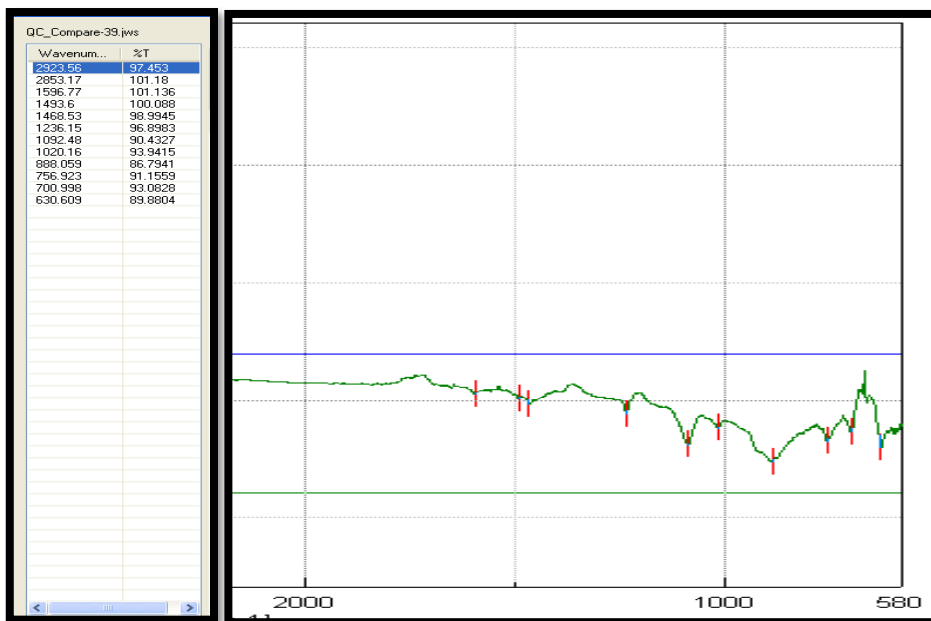


➤ *Temperatura a 400 °C*



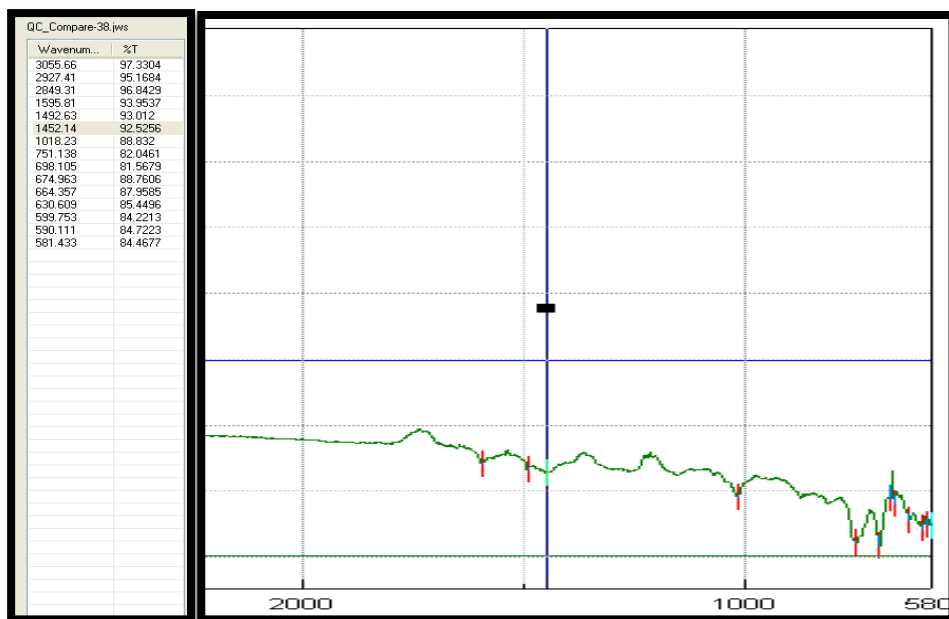
**Gráfico 9-3.** Análisis FTIR de la fracción sólida obtenida de la pirólisis térmica a 400 °C con un tiempo de residencia de 5min  
**Fuente:** Laboratorio Análisis Instrumental ESPOCH  
**Realizado por:** Núñez Nelson, 2019

➤ *Temperatura a 425 °C*



**Gráfico 10-3.** Análisis FTIR de la fracción sólida obtenida de la pirólisis térmica a 425 °C con un tiempo de residencia de 5min  
**Fuente:** Laboratorio Análisis Instrumental ESPOCH  
**Realizado por:** Núñez Nelson, 2019

➤ *Temperatura a 450 °C*



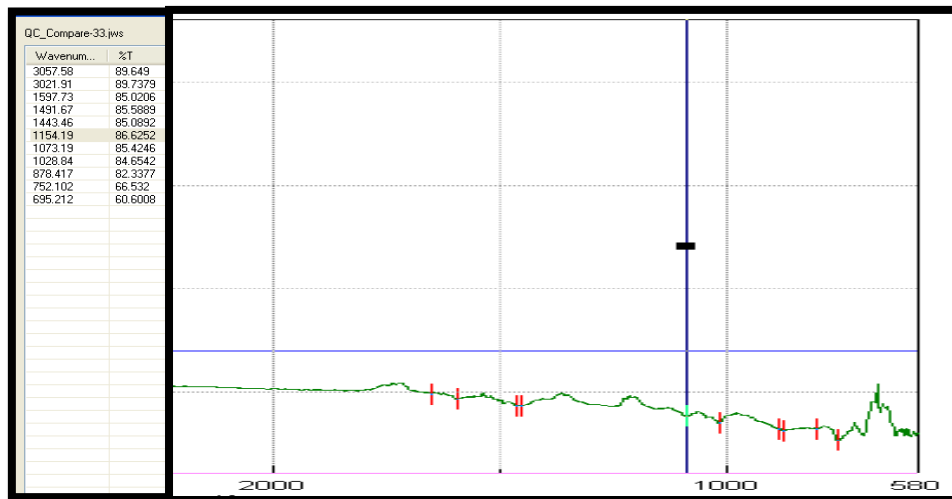
**Gráfico 11-3.** Análisis FTIR de la fracción sólida obtenida de la pirólisis térmica a 450 °C con un tiempo de residencia de 5min

**Fuente:** Laboratorio Análisis Instrumental ESPOCH

**Realizado por:** Núñez Nelson, 2019

3.11.2 Espectro IR de los residuos sólidos de la pirólisis a 10min

➤ *Temperatura a 375 °C*

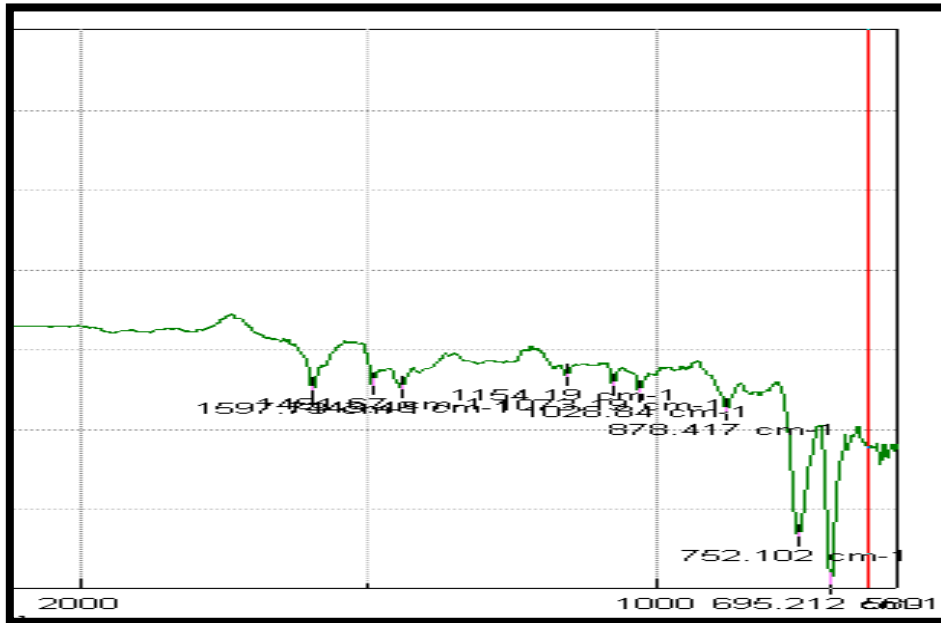


**Gráfico 12-3.** Análisis FTIR de la fracción sólida obtenida de la pirólisis térmica a 375 °C con un tiempo de residencia de 10min

**Fuente:** Laboratorio Análisis Instrumental ESPOCH

**Realizado por:** Núñez Nelson, 2019

➤ *Temperatura a 400 °C*

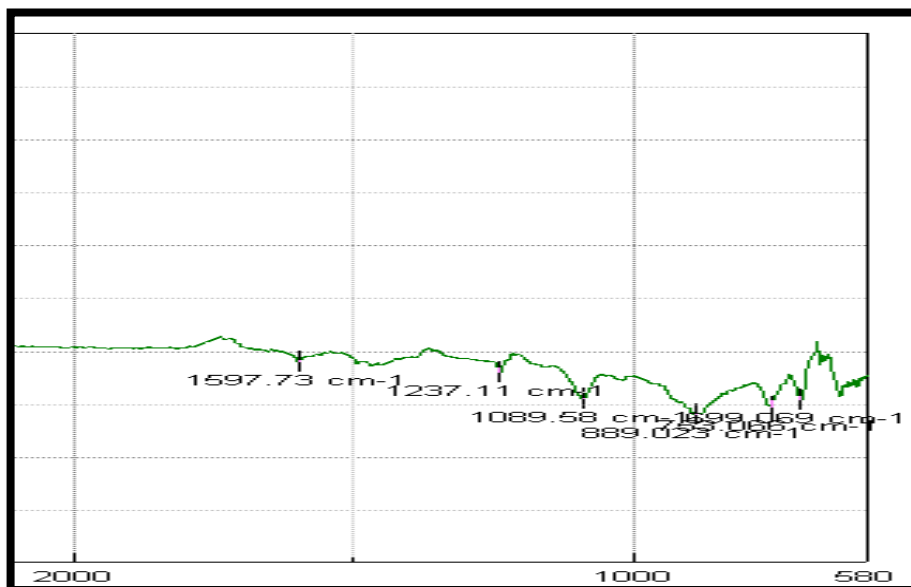


**Gráfico 13-3.** Análisis FTIR de la fracción solida obtenida de la pirólisis térmica a 400 °C con un tiempo de residencia de 10min

Fuente: Laboratorio Análisis Instrumental ESPOCH

Realizado por: Núñez Nelson, 2019

➤ *Temperatura a 425 °C*

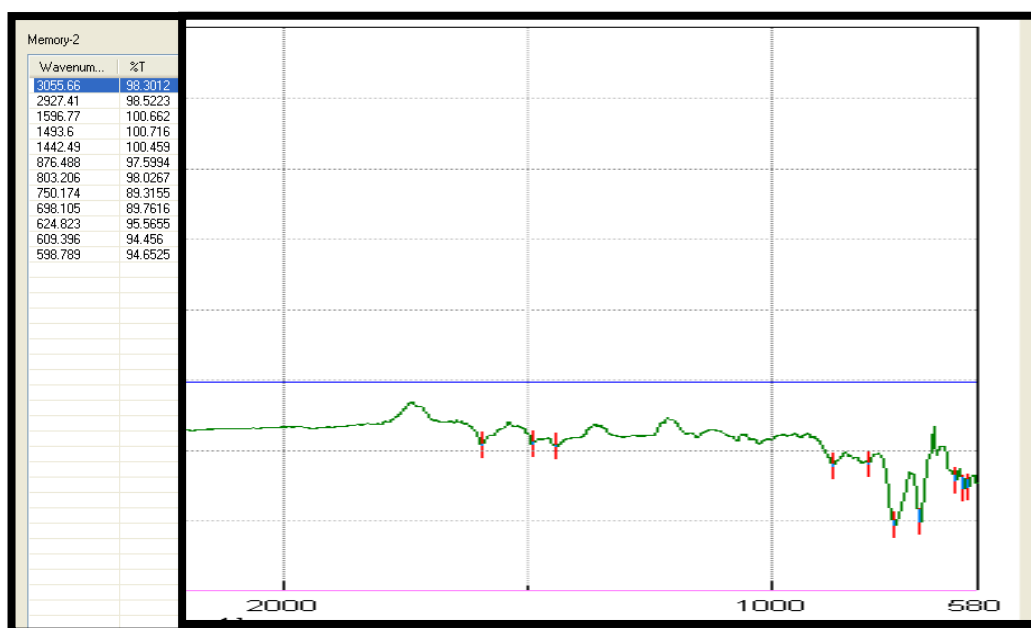


**Gráfico 14-3.** Análisis FTIR de la fracción solida obtenida de la pirólisis térmica a 425 °C con un tiempo de residencia de 10min

Fuente: Laboratorio Análisis Instrumental ESPOCH

Realizado por: Núñez Nelson, 2019

➤ *Temperatura a 450 °C*



**Gráfico 15-3.** Análisis FTIR de la fracción sólida obtenida de la pirólisis térmica a 450 °C con un tiempo de residencia de 10min

**Fuente:** Laboratorio Análisis Instrumental ESPOCH

**Realizado por:** Núñez Nelson, 2019

En el análisis IR de la muestra sólida obtenida en el proceso de pirólisis se demuestra que en todos los casos nos da picos similares no muy relevantes dando a conocer que el sólido tiene características al carbón, además en los picos observados no presenta grupos significativos esto debido a que la muestra es sólida el Espectrofotómetro IR no pudo leer correctamente dichas muestras. Además de eso presenta frecuencias dando una intensidad débil entre 580 y 1000cm<sup>-1</sup> con grupos funcionales mono sustituidos de C-H.

### 3.12. Requerimientos de tecnología, equipos y maquinaria.

*Los equipos tecnológicos y maquinaria requerida en este proyecto son los siguientes;*

**Tabla 11-3:** Características y descripción de los equipos.

EQUIPOS	CARACTERISTICAS	DESCRIPCION
Reactor de pirólisis	<ul style="list-style-type: none"> <li>Automático</li> <li>Fácil utilización</li> <li>Alimentación eléctrica</li> <li>Limpieza manual</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fabricado en acero inoxidable austenítico 309</li> <li>Base estructural</li> <li>Cilindro de acero inoxidable</li> <li>Resistencias de 300W, 220V</li> <li>Aislante: fibra de cerámica</li> <li>Sistema de ventilación: ventiladores centrífugos</li> <li>Tapa del reactor presenta un sistema de bridas</li> <li>Manómetro 200PSI</li> <li>Válvulas de seguridad</li> <li>Llaves de paso</li> <li>T de bronce</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pirómetro de 1200W</li> <li>• Acoples cónicos roscados</li> <li>• Brida de acero inoxidable</li> <li>• Pletinas de sustentación</li> <li>• Swich de un punto</li> </ul>
Condensador	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manual</li> <li>• Fácil utilización</li> <li>• Alimentación eléctrica</li> <li>• Limpieza manual</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fabricado en acero inoxidable</li> <li>• Base estructural</li> </ul>
Balanza Analítica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Automática</li> <li>• Fácil utilización</li> <li>• Alimentación eléctrica</li> <li>• Limpieza manual</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Equipo de sobremesa</li> <li>• Platillo de acero inoxidable</li> <li>• El dispositivo display puede situarse en diferentes lugares.</li> <li>• Cable de 1,5 m. de longitud.</li> <li>• Tamaño del display: 200x100x55 mm.</li> <li>• Tamaño del dígito: 25 mm.</li> <li>• Otras unidades de pesaje: lb, oz, ozt, tLH, tLT</li> <li>• Puede funcionar también mediante baterías (9 V)</li> <li>• Función de auto desconexión (AUTO-OFF) para ahorrar energía tras un lapso de 3 minutos.</li> <li>• Adaptador RS 232 C bidireccional para conexión al ordenador o impresora.</li> </ul>
Balanza digital	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Digital</li> <li>• Fácil utilización</li> <li>• Limpieza manual</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Equipo de sobremesa</li> <li>• Otras unidades de pesaje: lb, oz</li> <li>• Funciona mediante baterías</li> <li>• Tamaño del dígito: 25 mm.</li> </ul>
Probeta	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Material de vidrio</li> <li>• Fácil utilización</li> <li>• Limpieza manual</li> <li>• Medición de volumen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Material de vidrio o plástico</li> <li>• Varias dimensiones</li> <li>• Medida exacta</li> </ul>
Matraz Erlenmeyer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Material de vidrio</li> <li>• Medición de volumen</li> <li>• Fácil utilización</li> <li>• Limpieza manual</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fabricados con vidrio de borosilicato Pyrex™ para ofrecer la más alta resistencia a choques térmicos y corrosión química</li> <li>• Graduaciones y zona de rotulación en esmalte blanco</li> <li>• Graduados en toda su capacidad</li> <li>• Impresos con código de trazabilidad para consulta de certificado de lote descargable</li> <li>•</li> </ul>
Espectrofotómetro infrarrojo FTIR 8400S	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Material de acero</li> <li>• Identificación de grupos funcionales</li> <li>• Utilización con previo conocimiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• JASCO FT/IR-4100</li> <li>• Grupos funcionales</li> <li>• Espectros</li> <li>• Bandas características</li> </ul>

**Fuente:** Tomado de cotización de equipos

**Realizado por:** Núñez Nelson, 2019

### 3.13. Análisis del costo/beneficio del proyecto.

#### 3.13.1 Análisis de costo de la materia prima e insumos

**Tabla 12-3:** Costos de materia prima, insumos y otros componentes para obtención de combustible a partir de la pirólisis térmica de poliestireno reciclado

Materias Primas	Costos (\$)	Unidad
Poliestireno	10	3.5 Kg

Realizado por: Nelson Núñez, 2019

#### 3.13.2 Análisis de costos de equipos e instrumentos de laboratorio

**Tabla 13-3:** Costos de producción para la obtención de combustible a partir de la pirólisis térmica de poliestireno reciclado

		Cantida d	COSTO (\$)
Equipos para la PRODUCCIÓN	Condensador	1	2000,00
	Refrigerante	1	25,00
	Matraz Erlenmeyer	1	6,00
	Codo de vidrio	1	24,00
	Botellas ámbar	10	25,00
Total			\$2080,00
Equipos para el CONTROL DE PROCESOS	Balanza analítica	1	350,00
	Cronómetro	1	07,00
Total			\$357,00

Realizado por: Núñez Nelson, 2019

**Tabla 14-3:** Costos de materiales para el control de calidad

MATERIALES		Costo (\$/unidad)	Cantida d	Total (\$)
Vaso de precipitación	250 ml	8,00	1	8,00
	500 ml	12,00	3	36,00
	1000 ml	14,80	3	44,40
Probeta	1000 ml	18,50	1	18,50
	500 ml	14,80	1	14,80
Destilador ASTM 86		900,00	1	900,00
Bomba calorimétrica		2000,00	1	2000,00
Pensky-martens		850,00	1	850,00
Termo hidrómetro		35,00	2	70,00
Centrifuga		725,00	1	725,00
Analizador de azufre total		3000,00	1	3000,00
Costo total				\$121,70

Realizado por: Núñez Nelson, 2019

### 3.14. Cronograma de ejecución del proyecto

ACTIVIDADES	TIEMPO																			
	MES 1				MES 2				MES 3				MES 4				MES 5			
Revisión de fuente Bibliográfica	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Adquisición de la materia prima			■																	
Pruebas de laboratorio para análisis experimental			■	■																
Identificación de las variables de proceso				■	■															
Pruebas para la obtención de combustible					■	■														
Obtención del producto						■	■	■												
Pruebas físico químicas del combustible obtenido								■	■	■	■									
Validación del proceso industrial										■	■	■								
Caracterización final del producto												■	■	■						
Revisión y correcciones del trabajo final de titulación														■	■					
Empastado y presentación del trabajo final															■	■	■			
Sustentación final																			■	■

Realizado por: Núñez Nelson, 2019

## ANALISIS DE RESULTADOS

**Tabla 15-3:** Resultados de las fracciones líquidas, sólidas y gaseosas obtenida de la pirólisis a diferentes temperaturas en un tiempo de residencia de 5 minutos

5min	LIQUIDO	SÓLIDO	GAS
T (°C)	%	%	%
375	73,7927	1,8445	24,3629
400	80,6049	0,5612	18,0831
425	78,3512	0,6385	21,0103
450	80,6253	2,1561	17,2186

Realizado por: Núñez Nelson, 2019

**Tabla 16-3:** Resultados de las fracciones líquidas, sólidas y gaseosas obtenida de la pirólisis a diferentes temperaturas en un tiempo de residencia de 10 minutos

10min	LÍQUIDO	SÓLIDO	GAS
T (°C)	%	%	%
375	76,5614	0,9017	22,5369
400	81,4136	1,1640	17,4224
425	79,0833	2,2824	18,6343
450	79,2844	2,3037	18,4119

Realizado por: Núñez Nelson, 2019



**Tabla 17-3:** Resultados de los hidrocarburos presentes en la fracción líquida de las diferentes pruebas

T (°C)	t(min)	Hidrocarburos Totales	(C6-C12)	(>C12-C20)	(>C20-C28)	(>C28-C40)
375	5	89,69	29,7	42,37	13,01	4,62
400	5	88,55	29,68	37,87	15,05	5,95
425	5	87,91	30,65	37,07	14,64	5,55
450	5	79,46	30,17	29,02	14,68	5,58
375	10	75,27	26,57	32,12	11,81	4,77
400	10	97,56	34,29	41,02	15,92	6,33
425	10	78,13	30,17	28,53	14,19	5,24
450	10	79,02	29,27	22,02	22,73	4,99

Realizado por: Núñez Nelson, 2019

**Tabla 18-3:** Resultados de los hidrocarburos presentes en la fracción líquida a 425°C

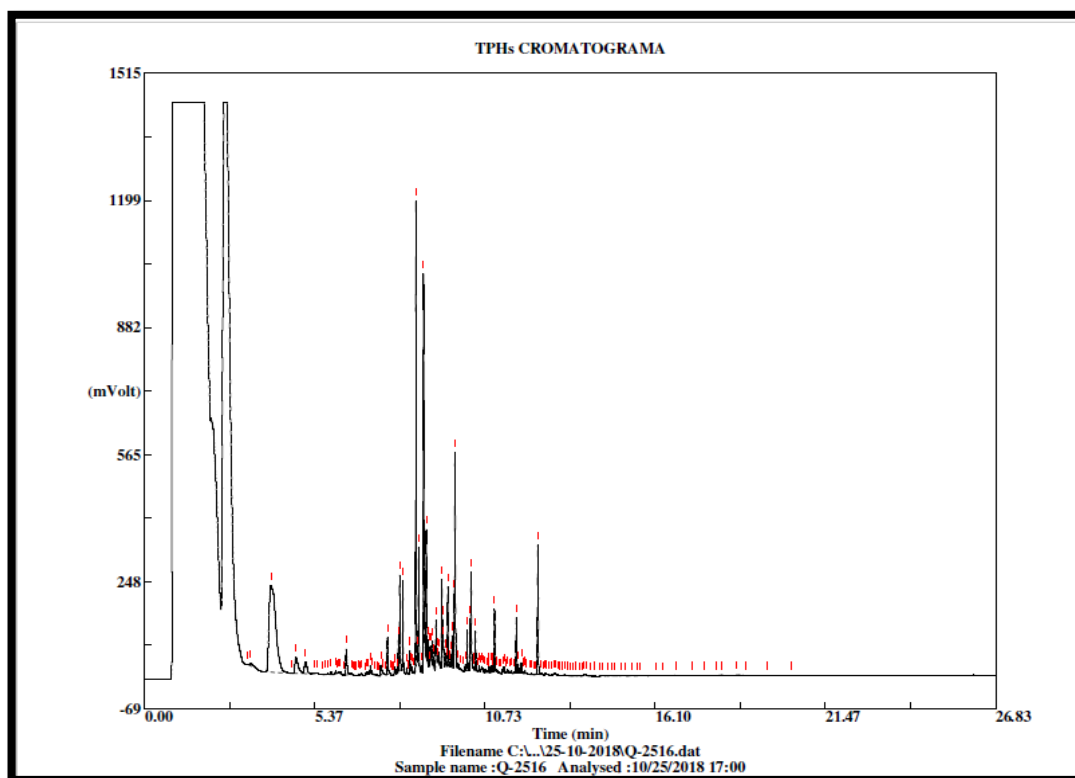
Parámetros	Metodología	Unidad	Resultado	Valor Límite Permisible
(C6-C12)	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	30,65	-
>C12-C20	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	37,07	-
>C20-C28	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	14,64	-
>C28-C40	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	5,55	-
Hidrocarburos Totales	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	87,91	-

Realizado por: Núñez Nelson, 2019

**Tabla 19-3.** Comparación de las propiedades físico-químicas del combustible obtenido con combustibles comerciales

Ensayo	Unidad de medida	Resultado	U(2)	Diésel Premium		Diésel No.1		Diésel No.2		Biodiesel	
				MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
Gravedad API a 60 °F	°API	19,8	±0,6%	35,7	-	35,7	-	39	-	-	-
Densidad Relativa 15,6°C.	-	0,9352	±0,6%	-	0,847			0,87	-	-	0,991
Contenido de azufre W	mg/kg	112	±3,6%	-	500	-	300	-	700	-	0,05
Viscosidad cinemática a 40°C.	mm <sup>2</sup> /s	1,026	NA	2,0	5,0	1,3	3,0	2,5	6,0	-	100
Contenido de agua y sedimento	%V	0,50	NA	-	0,05	-	0,05	-	0,05	-	0,05
Destilación del 90%	°C	325	NA	-	360	-	288	-	360	-	360
Punto de inflamación	°C	30	NA	51	-	40	-	51	-	-	60
Numero de cetano calculado		20,06	NAx	45	-	45	-	40	-	47	-
Poder calórico	mj/kg	48,5568	±0,445	43,0	44,53	43,0	-	43,0		37,27	-

Realizado por: Núñez Nelson, 2019



**Gráfico 16-3.** Cromatograma de la fracción líquida obtenida a 425<sup>0</sup>C a 5min

**Fuente:** Laboratorio de Análisis CESTA

**Realizado por:** Núñez Nelson, 2019

Para obtener combustible líquido a partir de la pirólisis térmica de poliestireno, se utilizó primordialmente el reactor de pirólisis que se encuentra en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, el cual genera las condiciones adecuadas para que el proceso se lleve a cabo. El reactor genera un ambiente libre de oxígeno para que la pirólisis se efectúe de forma adecuada manteniendo el control de las variables principales como son la temperatura y la presión para obtener la fracción líquida adecuada a una temperatura de 425 °C.

De acuerdo a Miandad et al. (2016) El polímero con el que mejor rendimiento se obtiene en cuestión a la fracción líquida es el poliestireno con un porcentaje de 80,8% con un tiempo de residencia de 75min, esto en comparación con el PP y PE con porcentajes inferiores a éste, el gran porcentaje obtenido en la fracción líquida se debe a su estructura simple en comparación a otros tipos de polímeros, además de ser una pirólisis lenta. Esto se compara con los resultados obtenidos de la fracción líquida con un porcentaje de 79,08% a una temperatura de 425 °C dándonos los mejores resultados tabulados estadísticamente siendo esta una pirólisis rápida, así los resultados son similares entre sí.

Una vez obtenido el combustible a 425 °C se determinan sus propiedades químicas y físico-químicas del combustible obtenido se identificaron variables como: densidad (0,9352 g/ml), viscosidad cinemática a 40°C (1,026mm<sup>2</sup>/s o cSt), numero de cetano calculado (20,6 ), API

(19,8), contenido de azufre (112 mg/kg), contenido de agua y sedimento (0,50%V), poder calorífico (48,5568 mj/kg) dándonos valores similares en comparación con el trabajo realizado por Abdullah, et al. (2018) ya que se presentaron resultados como son su densidad (0.89 g/ml), viscosidad cinemática a 40°C (0.78 cSt); poder calorífico (43.83 mJ/kg) cuyos valores fueron realizados para la muestra de mayor rendimiento líquido. Así el parámetro más importante para un combustible es su densidad debido a puede dañar el motor si tiene una densidad muy alta. Además el poder calorífico es un parámetro significativo que debe medirse en el aceite líquido, éste determina la cantidad de energía liberada cuando un combustible se quema totalmente, este valor de 48,5568 mJ/kg se encuentra dentro de los parámetros descritos por la norma para diésel que tiene un valor mínimo de 43,0 mJ/kg.

En cuestión a las propiedades de la fracción líquida se puede realizar la comparación con la NORMA NTE INEN 1489:2012 Productos derivados del petróleo. Diésel (Ecuador) la cual nos da a conocer los requisitos que debe cumplir el diésel que se comercializa en el país, y así determinar si el combustible que se obtuvo se lo puede tratar o no como diésel dándonos los resultados presentados en el Anexo E. A partir de estos resultados al ser similares a un combustible comercial se lo puede utilizar como fuente de energía o mezclarlo con diésel en proporciones de 20% y 40% (Rehan et al., 2016); al realizar la mezcla entre la fracción líquida en 20% y diésel comercial se determina una eficiencia similar en términos de energía, siendo una forma prometedora de generar electricidad.

El aceite líquido obtenido a partir de la pirólisis de plástico contiene algunas impurezas tales como azufre, cloro, residuos sólidos, humedad y ácidos debido a que en la fabricación del polímero a éste se le añade aditivos para que tenga las propiedades de un termoplástico, también la fracción líquida posee altos contenidos de aromáticos esto dado que la descomposición térmica del PS produce principalmente estireno, tolueno, etileno benceno y otros monómeros de estireno Artetxe et al. (2015, p. 126-133); por lo que la fracción líquida para ser utilizada como combustible debe ser mezclada con el diésel convencional en la proporciones descritas anteriormente, la presencia de compuestos no deseados no solo disminuye la calidad del aceite líquido sino también limita sus aplicaciones.

## CONCLUSIONES

- En el proceso de obtención de combustible por medio de la pirólisis térmica de poliestireno se logró obtener tres fracciones del mismo, las cuales fueron líquida, sólida y gaseosa siendo la fracción líquida la que mayormente se obtuvo con un resultado de 79% en masa, identificando las variables del proceso que son significativas se determina que la temperatura óptima del proceso es a 425°C y el tiempo no es un factor determinante en el proceso. Así el combustible que se obtuvo se lo puede utilizar como una fuente de energía alternativa para motores diésel de uso múltiple, además de poder utilizarlo como una mezcla con combustible comercial, se lo utiliza también para generar electricidad.
- Mediante los análisis químicos y físico-químicos realizados a la fracción líquida obtenida se puede observar que dentro de los parámetros que rigen a los combustibles comerciales esta fracción puede ser sometida a dichas pruebas como son: densidad relativa, gravedad API, densidad, viscosidad cinemática, contenido de agua y sedimentos, contenido de azufre, punto de inflamación, índice de cetano calculado; mediante lo cual se puede determinar que el producto líquido obtenido presenta características que se encuentran dentro de los parámetros de un combustible, mientras que pocos parámetros no se encuentran dentro de lo establecido por la norma NTE INEN 1489:2012
- En comparación con la norma técnica Ecuatoriana NTE INEN 1489:2012 y los parámetros establecidos por los análisis de la muestra líquida se determina que el índice de cetano calculado no se encuentra dentro de la norma al arrojar un resultado de 20,6 y lo establecido por la norma es de un índice de cetano calculado de 45, la destilación del 90% se realiza a una temperatura de 325°C mientras la norma establece que la temperatura de destilación del 90% sea hasta 360°C, el punto de inflamación no se encuentra dentro del rango establecido dado que el resultado es de 30 °C en comparación con lo establecido a una temperatura de 40°C; el contenido de azufre del producto dio un resultado de 112 mg/kg en comparación a la norma que establece un máximo de 500mg/kg por lo que se encuentra dentro de las especificaciones, la viscosidad cinemática no se encuentra dentro del rango establecido entre 1,9 a 5 mm<sup>2</sup>/s ya que nos arrojó un resultado de 1,026 mm<sup>2</sup>/s, el contenido de agua y sedimento arrojó un resultado es de 0,50% V y la norma establece un máximo de 0,05% V; dando así parámetros semejantes a un combustible convencional pero que pueden ser mejorados mediante tratamientos posteriores.
- Al tener los parámetros químicos y físico-químicos se puede determinar que la fracción líquida obtenida a partir de la pirólisis térmica de poliestireno puede ser tratada como un

combustible para motores diésel de uso múltiple o como materia de mezcla al poder combinarla con combustibles convencionales tipo diésel para reducir el consumo de los mismos y generar una fuente de energía alternativa, así el combustible obtenido se lo puede tratar posteriormente mediante una destilación fraccionada o refinación para que éste posea condiciones más favorables y posea un mayor número de aplicaciones. Así la pirólisis de poliestireno es un método efectivo de reciclaje químico con varios beneficios como es la disposición de los desechos plásticos y la producción de energía.

## RECOMENDACIONES

- Al utilizar el reactor de pirólisis se debe seguir las instrucciones de uso del mismo para evitar que ocurran accidentes o incidentes humanos o materiales.
- Investigar la fracción líquida obtenida como cutter stok o diluyente para fuel oil, debido a que presenta propiedades físico-químicas que se asemejan a este tipo de compuesto lo cual aportaría mayormente a la industria petrolera.
- El presente proyecto es un punto de partida para nuevas investigaciones que involucren la combinación de distintos polímeros una vez conociendo el rendimiento más óptimo del poliestireno y así obtener un nuevo producto con mayores propiedades que contribuya como una nueva fuente de energía
- Controlar en todo momento las variables principales del proceso ya que el éxito para la obtención del producto depende del proceso adecuando y las condiciones de la materia prima.
- A partir de los resultados obtenidos la fracción líquida obtenida de la pirólisis de poliestireno, esta puede ser investigada a futuro como fuel oil cambiando las variables a controlar además de utilizar algún tipo de catalizador o a su vez el mismo combustible fraccionarlo y romper sus cadenas aún más para que el combustible sea más puro.

## GLOSARIO

°C	Grados centígrados
cSt	centiestokes
FTIR	Espectroscopia de transmisión de infrarrojo con transformada de Fourier
HDPE	Polietileno de alta densidad
HIPS	Poliestireno de alto impacto
Kg	Kilogramo
LDPE	Polietileno de baja densidad
mg	Miligramo
mm <sup>2</sup> /s	milímetros cuadrado por Segundo
mns	Metros sobre el nivel del mar
NTE	Norma técnica ecuatoriana
PE	Polietileno
PET	Tereftalato de polietileno
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PSI	libra por pulgada cuadrada
PVC	Poli cloruro de vinilo
SPI	Sociedad de la Industria de Plásticos
t	Tiempo (s)
TGA	Análisis termogravimétrico



## BIBLIOGRAFÍA

**AL SALEM et. al.,** Valoración de residuos plásticos sólidos PSW por rutas primarias a cuaternarias. *Valoración de residuos plásticos sólidos PSW por rutas primarias a cuaternarias*. s.l.:Journal Molecular 2010, pp. 103-129.

**AL SALEM et al.** A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste. *A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste. Canada: Enviromental Management*, 2017. pp. 178-180.

**ARACIL SÁEZ, Ignacio.** *Formación de contaminantes y estudio cinético en la pirólisis y combustión de plásticos (PE, PVC y PCP)*. En Tesis Doctoral, de Font Montesinos, Rafael Conesa, Juan Antonio Ferrer Aracil I, 2. Alicante: Universitaria, 2008.

**ARANDES et al., 2004.** *Reciclado de residuos plásticos*. En: Reciclado de residuos plásticos. Bilbao: Revista Iberoamericana de Polímeros, pp. 4-5.

**ASTM INTERNATIONAL**, [en línea], s.f. [Consulta: 09 de Marzo de 2019.] Disponible en: [https://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPSO13/nadkarnihepburn\\_sps13.html](https://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPSO13/nadkarnihepburn_sps13.html)

**BERENGUER MUÑOZ, Deseada.** *Craqueo catalítico de polímeros: estudio de diferentes sistemas polímero/catalizador*. Universidad de Alicante, 2009. págs. 44-49.

**British Plastic Federation Oil Construction, BPF** [En línea] 2018.

**BUEKENS, Alfons G.** *Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics: Converting Waste Plastics into Diesel and Other Fuels*. Editado por J. Scheirs and W. Kaminsky. John Wiley & Sons, Ltd, 2006.

**CARE, HEALTH.** Greenpeace. [En línea] [Consulta: 09 de Marzo de 2019.]. Greenpeace.

**CONTRERAS, Francisco.** *Estudio de Pirólisis Catalítica de Propileno en un Reactor semi-batch*. Santiago de Chile, 2014, p. 15-17

**ESPINOZA, Eduardo.** *Modelo de Gestión de Residuos Plásticos...* Argentina: Mensoza, 2009. II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. pág. 2.

**ETHNA, María and OCLES, Gudiño.** *Las industrias del sector poliestireno en el marco del Código Orgánico de la Producción*. 2017, p. 12-84

**FUENTES, Edwin G. et.al.** “MECANISMOS DE DEGRADACIÓN TÉRMICA Y CATALÍTICA DE POLYSTYRENE THERMAL AND CATALYTIC DEGRADATION MECHANISMS”. *Avances en Ciencias e Ingeniería*. 2012, Vol. 3, nº 3, p. 69-81

**PARRES GARCÍA, Francisco J.** *Investigación de las variables limitantes en la recuperación de residuos de poliestireno procedentes del sector envase*. [En línea]. Mayo 2005. Disponible en : <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/1852/tesisUPV2291.pdf>

**HERNÁNDEZ FÉREZ, Remedio.** *Evaluación de la pirólisis térmica y catalítica de polietileno en lecho fluidizado como técnica de reciclado: influencia de las variables sobre los productos generados*. Universidad de Alicante, 2007., p. 27-30.

**INEC. 2016.** *Información Ambiental en Hogares*, p. 5–19.

**INEN 2634.** *Disposición de Desechos Plásticos Post-Consumo. Requisitos. 2012*, págs. 5-8.

**IPIALES, Paul.** *Desarrollo de una ingeniería conceptual para el proceso de pirólisis catalítica de residuos plásticos de polipropileno y poliestireno*. Riobamba, 2018.

**JORDAN, William and ZURITA, Paul,** *Diseño y Construcción de un Reactor de Pirólisis Térmica, para el Aprovechamiento de Residuos Plásticos de Polipropileno, Generados en la Epoch*. 2018, pp. 101 Kaminsky, W. CHEMTECH. En: Alicante: s.n., 1992. p. 16.

**MANCHENO, Myriam, et al.** Aprovechamiento energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos, por medio de pirólisis. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, 2016, vol. 23, no 1, p. 60-67.

**MIANDAD, R., et.al.** "Influence of temperature and reaction time on the conversion of polystyrene waste to pyrolysis liquid oil". *Waste Management*, vol. 58, pp. 250-259.

**MIANDAD, R., et.al.** “Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil.” *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 119, pp. 239-252.

**PlasticsEurope 2015.** *Plastics - the facts 2014/2015: An analysis of European plastics production, demand and waste data*. PlasticsEurope, 1–34. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.01.015>

**REHAN, M., et.al.** *Pyrolytic liquid fuel: a source of renewable energy in Makkah Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. Vol. 38, nº 17, p. 2598-2603

**REZAGOS,** rezagos.com. [En línea] 2018. [Consulta: 25 de febrero de 2018.]. Disponible en: <http://www.rezagos.com/pages/reciclado-de-plastico.html>

**ROCA GIRÓN, Iván Ernesto.** *Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del polietileno de alta densidad (PEAD).* En: Guatemala: s.n., 2005. p. 30-33.

**SALTOS, P, et.al.** *Reciclaje de Poliestireno Expandido por el Método de Disolución Precipitación.* 2015, Vol. 36, nº 2, p. 36(2).

**SULLIVAN A. Y BALL R.** *“Thermal decomposition and combustion”* En: Thermal decomposition and combustion. s.l.:Atmospheric Environment, 2012. pp. 133-147.

**The state of plastics: World Environment Day Outlook 2018.** [Consulta: 25 de Febrero de 2019.]. Disponible en:  
[https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/25513/state\\_plastics\\_WED\\_SP.pdf?isAllowed=y&sequence=5](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/25513/state_plastics_WED_SP.pdf?isAllowed=y&sequence=5)

**WESTERHOUT, R et. al.** *Experimental Determination of the Yield of Pyrolysis Products of Polyethene and Polypropene . Influence of Reaction Conditions.* 1998, Vol. 5885, nº 97, p. 841-847

**ANEXOS**

**ANEXO A.** Norma Técnica Ecuatoriana para productos derivados del petróleo. Diésel



Quito - Ecuador

**ENMIENDA**

(2013-06-14)

---

**NORMA TÉCNICA ECUATORIANA      NTE INEN 1489:2012**  
**Séptima revisión**

---

**PRODUCTOS DERIVADOS DEL PETRÓLEO.      DIÉSEL.**  
**REQUISITOS**

Primera edición

PETROLEUM PRODUCTS. DIESEL. REQUIREMENTS

First edition

Notas	Categoría del diagrama	ESPOCH Realizado por: Nelson Núñez	Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1489:2012. Productos derivados del petróleo. Diésel		
			Escala	Fecha	Lámina
	a)Por aprobar b)Por calificar c)Por certificar		A4	2019	1

**ANEXO B.** Norma Técnica Ecuatoriana para productos derivados del petróleo. Diésel

<b>Análisis</b>	<b>Unidad</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Método de ensayo</b>
<b>Punto de inflamación</b>	°C	40	-	NTE INEN 1047
<b>Contenido de agua</b>	% en volumen	-	0,05	NTE INEN 1494
<b>Índice de cetano calculado</b>	-	40	-	NTE INEN 1495
<b>Viscosidad cinemática @ 37,8°C</b>	cSt	1,3	3,0	NTE INEN 810
<b>Temperatura de destilación del 90%</b>	°C	-	288	NTE INEN 926
<b>Contenido de azufre</b>	% en peso	-	0,3	NTE INEN 1490
<b>Corrosión lámina de cobre</b>	-	-	No. 2	NTE INEN 927
<b>Contenido de Cenizas</b>	% en peso	-	0,01	NTE INEN 1492

Notas	Categoría del diagrama	ESPOCH Realizado por: Nelson Núñez	Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1489:2012. Productos derivados del petróleo. Diésel		
			Escala	Fecha	Lámina
	a)Por aprobar b)Por calificar c)Por certificar		A4	2019	1

**ANEXO C. Norma Técnica Ecuatoriana para productos derivados del petróleo. Diésel**

<b>Análisis</b>	<b>Unidad</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Método de ensayo</b>
<b>Punto de inflamación</b>	°C	51	-	NTE INEN 1047
<b>Contenido de agua</b>	% en volumen	-	0,05	NTE INEN 1494
<b>Índice de cetano calculado</b>	-	45	-	NTE INEN 1495
<b>Viscosidad cinemática @ 37,8°C</b>	cSt	2,5	6,0	NTE INEN 810
<b>Temperatura de destilación del 90%</b>	°C	-	360	NTE INEN 926
<b>Contenido de azufre</b>	% en peso	-	0,7	NTE INEN 1490
<b>Corrosión lámina de cobre</b>	-	-	No. 3	NTE INEN 927
<b>Contenido de Cenizas</b>	% en peso	-	0,01	NTE INEN 1492
<b>Residuo carbonoso sobre el 10% del residuo de la destilación</b>	% en peso	-	0,15	NTE INEN 1491

Notas	Categoría del diagrama	ESPOCH Realizado por: Nelson Núñez	Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1489:2012. Requisitos Diésel No. 2		
			Escala	Fecha	Lámina
	a)Por aprobar b)Por calificar c)Por certificar		A4	2019	3




**ANEXO D.** Norma Técnica Ecuatoriana para productos derivados del petróleo. Diésel

Requisitos	Unidad	Mínimo	Máximo	Método de ensayo	
Punto de inflamación	°C	51	-	NTE INEN 1493 Procedimiento A	
Φ Contenido de agua y sedimento	%	-	0,05	NTE INEN 1494	
W Contenido de residuo carbonoso sobre el 10% del residuo de la destilación	%	-	0,15	NTE INEN 1491	
W contenido de cenizas	%	-	0,01	NTE INEN 1492	
Temperatura de destilación del 90%	°C	-	360	NTE INEN 926	
Viscosidad cinemática a 40°C	mm <sup>2</sup> /s	2,0	5,0	NTE INEN 810	
W contenido de azufre	%	-	0,05	ASTM 4294 NTE INEN 1490	
Corrosión a la lámina de cobre	Clasificación	-	No.3	NTE INEN 927	
Índice de cetano calculado	-	45	-	NTE INEN 1495	
Contenido de biodiésel, ΦBiodiésel	%	--- Nota	5	EN 14078 Action Windows Ir a Configuración de P	
NOTA. De no contener biodiesel, no es necesario la realización de este ensayo.					
Notas	Categoría del diagrama	ESPOCH Realizado por: Nelson Núñez	Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1489:2012. Requisitos Diésel Premium		
	a)Por aprobar b)Por calificar c)Por certificar		Escala	Fecha	Lámina
			A4	2019	4





**ANEXO F. Análisis químicos de la fracción líquida obtenida a 425°C a 5min**

	<p><b>CENTRO DE SERVICIOS TÉCNICOS Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA AMBIENTAL</b></p> <p>DEPARTAMENTO : <b>SERVICIOS DE LABORATORIO</b></p> <p>Panamericana Sur Km. 1 %, ESPOCH (Facultad de Ciencias) RIOBAMBA - ECUADOR Teléfono: (03) 3013183</p>																															
<p><b>INFORME DE ENSAYO No:</b> Q-2516-18 <b>ST:</b> 081- 18 ANÁLISIS DE QUÍMICOS</p> <p><b>Nombre Peticionario:</b> NA <b>Atn:</b> Paul Palmay <b>Dirección:</b> Riobamba Riobamba-Chimborazo</p> <p><b>FECHA:</b> 05 de Noviembre del 2018 <b>NUMERO DE MUESTRAS:</b> 1 <b>FECHA Y HORA DE RECEPCIÓN EN LAB:</b> 2018/10/24 – 11:20 <b>FECHA DE MUESTREO:</b> 2018/09/12 <b>FECHA DE ANÁLISIS:</b> 2018/10/24 – 2018/11/05 <b>TIPO DE MUESTRA:</b> Combustible <b>CÓDIGO CESTTA:</b> LAB-Q 2516-18 <b>CÓDIGO DE LA EMPRESA:</b> Temperatura: 425 a 5 min <b>PUNTO DE MUESTREO:</b> Laboratorio de Operaciones Unitarias <b>ANÁLISIS SOLICITADO:</b> Hidrocarburos Totales (Carbono 6 – Carbono 40) <b>PERSONA QUE TOMA LA MUESTRA:</b> Nelson Nuñez <b>CONDICIONES AMBIENTALES DE ANÁLISIS:</b> T máx.:25.0 °C, T mín.: 15.0 °C</p>																																
<p><b>RESULTADOS ANALÍTICOS:</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>PARÁMETROS</th> <th>MÉTODO/NORMA</th> <th>UNIDAD</th> <th>RESULTADO</th> <th>VALOR LÍMITE PERMISIBLE (■)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>(C6 – C12)</td> <td>PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005</td> <td>%</td> <td>30,65</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>(&gt;C12 – C 20)</td> <td>PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005</td> <td>%</td> <td>37,07</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>(&gt;C 20 – C 28)</td> <td>PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005</td> <td>%</td> <td>14,64</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>(&gt;C28 – C 40)</td> <td>PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005</td> <td>%</td> <td>5,55</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Hidrocarburos Totales</td> <td>PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005</td> <td>%</td> <td>87,91</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table>			PARÁMETROS	MÉTODO/NORMA	UNIDAD	RESULTADO	VALOR LÍMITE PERMISIBLE (■)	(C6 – C12)	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	30,65	-	(>C12 – C 20)	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	37,07	-	(>C 20 – C 28)	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	14,64	-	(>C28 – C 40)	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	5,55	-	Hidrocarburos Totales	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	87,91	-
PARÁMETROS	MÉTODO/NORMA	UNIDAD	RESULTADO	VALOR LÍMITE PERMISIBLE (■)																												
(C6 – C12)	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	30,65	-																												
(>C12 – C 20)	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	37,07	-																												
(>C 20 – C 28)	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	14,64	-																												
(>C28 – C 40)	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	5,55	-																												
Hidrocarburos Totales	PEE/CESTTA/07 TNRCC 1005	%	87,91	-																												
<p><b>OBSERVACIONES:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Muestra receptada en el laboratorio.</li> </ul>																																
<p><b>RESPONSABLE DEL INFORME:</b></p> <p style="text-align: center;">   <b>Dr. Mauricio Álvarez</b>  <b>RESPONSABLE TÉCNICO</b> </p>																																

Notas	Categoría del diagrama	ESPOCH Realizado por: Nelson Nuñez			
	a) Por aprobar b) Por calificar c) Por certificar		Escala	Fecha	Lámina
			A4	2019	6

**ANEXO G. Análisis estadístico**

## Análisis de Datos

Victor Morales-Oñate  
25/11/2018

**1. Selección de los datos y comprobación de supuestos de normalidad e igualdad de varianzas**

- Se despliega a continuación la tabla de datos para el análisis:

##	temp	liquido	solido	gas	tiempo	hidro
## 1	375	73.07830	3.3700	23.55170	5	89.69
## 2	375	74.00094	0.9231	25.07596	5	89.69
## 3	375	74.29880	1.2403	24.46090	5	89.69
## 4	400	80.01760	1.0339	18.94850	5	88.55
## 5	400	81.64250	0.2744	18.08310	5	88.55
## 6	400	80.15470	0.3752	19.47010	5	88.55
## 7	425	79.26150	0.4069	20.33160	5	87.91
## 8	425	78.43510	0.9027	20.66220	5	87.91
## 9	425	77.35710	0.6059	22.03700	5	87.91
## 10	450	80.95330	2.1475	16.89920	5	79.46
## 11	450	80.91920	2.3266	16.75420	5	79.46
## 12	450	80.00340	1.9942	18.00240	5	79.46
## 13	375	76.17850	0.6606	23.16090	10	75.27
## 14	375	76.88280	1.0005	22.11670	10	75.27
## 15	375	76.62300	1.0439	22.33310	10	75.27
## 16	400	81.28680	0.9646	17.74860	10	97.56
## 17	400	81.29950	1.1701	17.53040	10	97.56
## 18	400	81.65450	1.3574	16.98810	10	97.56
## 19	425	79.08950	2.7589	18.15160	10	78.13
## 20	425	79.02170	2.1935	18.78480	10	78.13
## 21	425	79.13860	1.8948	18.96660	10	78.13
## 22	450	78.51756	2.5270	18.95544	10	79.02
## 23	450	79.47519	2.2787	18.24611	10	79.02
## 24	450	79.86057	2.1054	18.03403	10	79.02

**Temperatura**

**Líquido (Cantidad)**

- Se realiza una prueba de normalidad sobre el porcentaje de líquido

```
##
## Shapiro-Wilk normality test
##
## data: datos$liquido
## W = 0.90563, p-value = 0.02839
```

Rechazo la hipótesis nula de normalidad. A continuación se presenta los resultados de igualdad de varianzas de Barlett:

Notas	Categoría del diagrama	ESPOCH Realizado por: Nelson Núñez	Análisis estadístico		
			Escala	Fecha	Lámina
	a)Por aprobar b)Por calificar c)Por certificar		A4	2019	7

Continuación

```

##
## Bartlett test of homogeneity of variances
##
## data: liquido by temp
## Bartlett's K-squared = 4.1926, df = 3, p-value = 0.2414
Rechazo la hipótesis nula de igualdad de varianzas. Es decir, cada nivel de temperatura presenta diferentes
varianzas en el porcentaje de líquido. / Para dos experimentos debería mejorar

Porcentaje de hidrocarburos (Calidad)

• Se realiza una prueba de normalidad sobre el porcentaje de hidrocarburos

##
## Shapiro-Wilk normality test
##
## data: datos$hidro
## W = 0.87266, p-value = 0.005934
Rechazo la hipótesis nula de normalidad. A continuación se presenta los resultados de igualdad de varianzas
de Barlett:

##
## Bartlett test of homogeneity of variances
##
## data: hidro by temp
## Bartlett's K-squared = 25.914, df = 3, p-value = 9.94e-06
Rechazo la hipótesis nula de igualdad de varianzas. Es decir, cada nivel de temperatura presenta diferentes
varianzas en el porcentaje de líquido

Tiempo

Líquido (Cantidad)

A continuación se presenta los resultados de igualdad de varianzas de Barlett:

##
## Bartlett test of homogeneity of variances
##
## data: liquido by tiempo
## Bartlett's K-squared = 2.4259, df = 1, p-value = 0.1193
No rechazo la hipótesis nula de igualdad de varianzas. Es decir, cada nivel de tiempo no se presentan
diferentes varianzas en el porcentaje de líquido. / 0.5

Porcentaje de hidrocarburos (Calidad)

A continuación se presenta los resultados de igualdad de varianzas de Barlett:

##
## Bartlett test of homogeneity of variances
##
## data: hidro by tiempo
## Bartlett's K-squared = 5.7694, df = 1, p-value = 0.01631
    
```

Notas	Categoría del diagrama	ESPOCH Realizado por: Nelson Núñez	Análisis estadístico		
			Escala	Fecha	Lámina
	a) Por aprobar b) Por calificar c) Por certificar		A4	2019	8

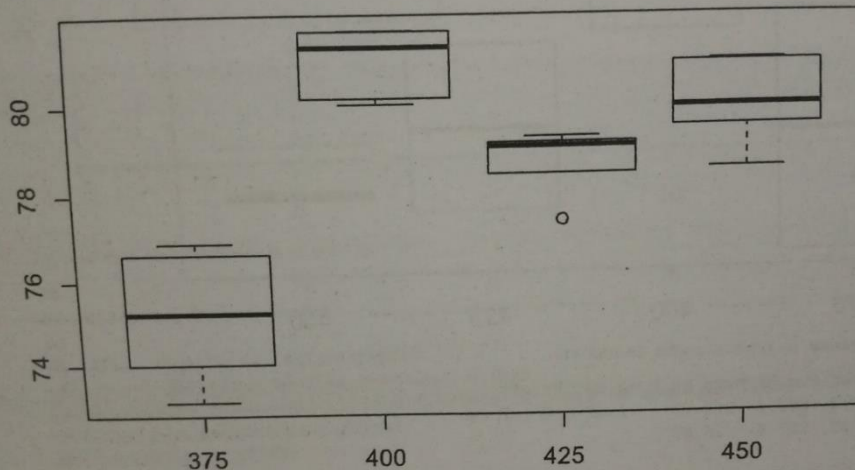
Rechazo la hipótesis nula de igualdad de varianzas. Es decir, cada nivel de tiempo presenta diferentes varianzas en el porcentaje de líquido.

## 2. Pruebas paramétricas

Debido a los hallazgos de la sección anterior (ausencia de normalidad y heterocedasticidad), se realiza a continuación las versiones robustas de la prueba anova de una vía.

### Temperatura

#### Líquido (Cantidad)



Se realiza a continuación la prueba anova de una vía

```
## Warning: package 'WRS2' was built under R version 3.4.4
```

```
##           Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
## factor(temp) 3 115.91   38.64   34.93 3.83e-08 ***
## Residuals  20  22.12    1.11
```

```
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

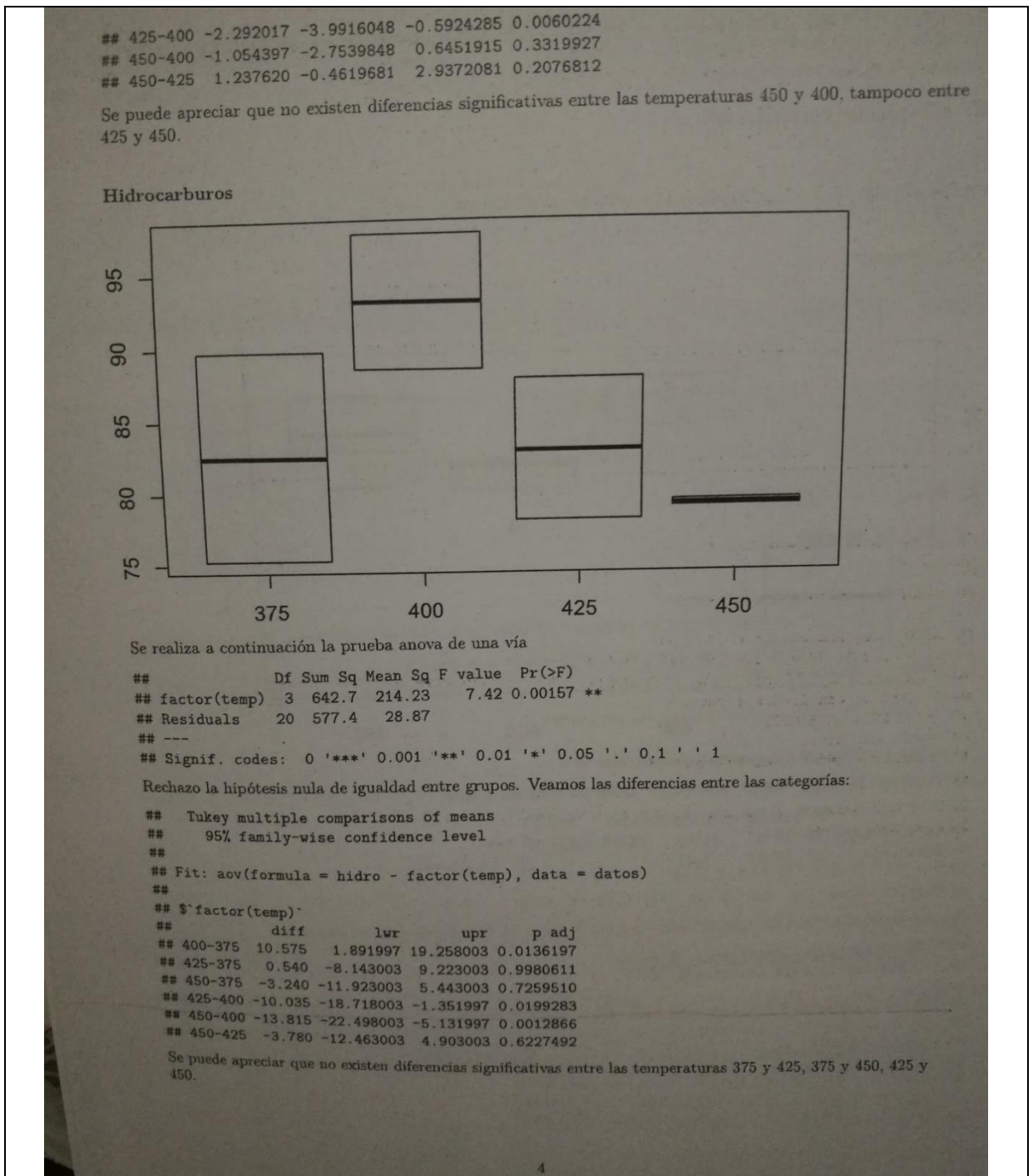
Rechazo la hipótesis nula de igualdad entre grupos. Veamos las diferencias entre las categorías:

```
## Tukey multiple comparisons of means
## 95% family-wise confidence level
##
## Fit: aov(formula = liquido ~ factor(temp), data = datos)
##
## $`factor(temp)`
##      diff      lwr      upr      p adj
## 400-375  5.832210  4.1326219  7.5317981 0.0000000
## 425-375  3.540193  1.8406052  5.2397815 0.0000581
## 450-375  4.777813  3.0782252  6.4774015 0.0000009
```

Notas	Categoría del diagrama	ESPOCH Realizado por: Nelson Núñez	Análisis estadístico		
			Escala	Fecha	Lámina
	a) Por aprobar b) Por calificar c) Por certificar		A4	2019	9

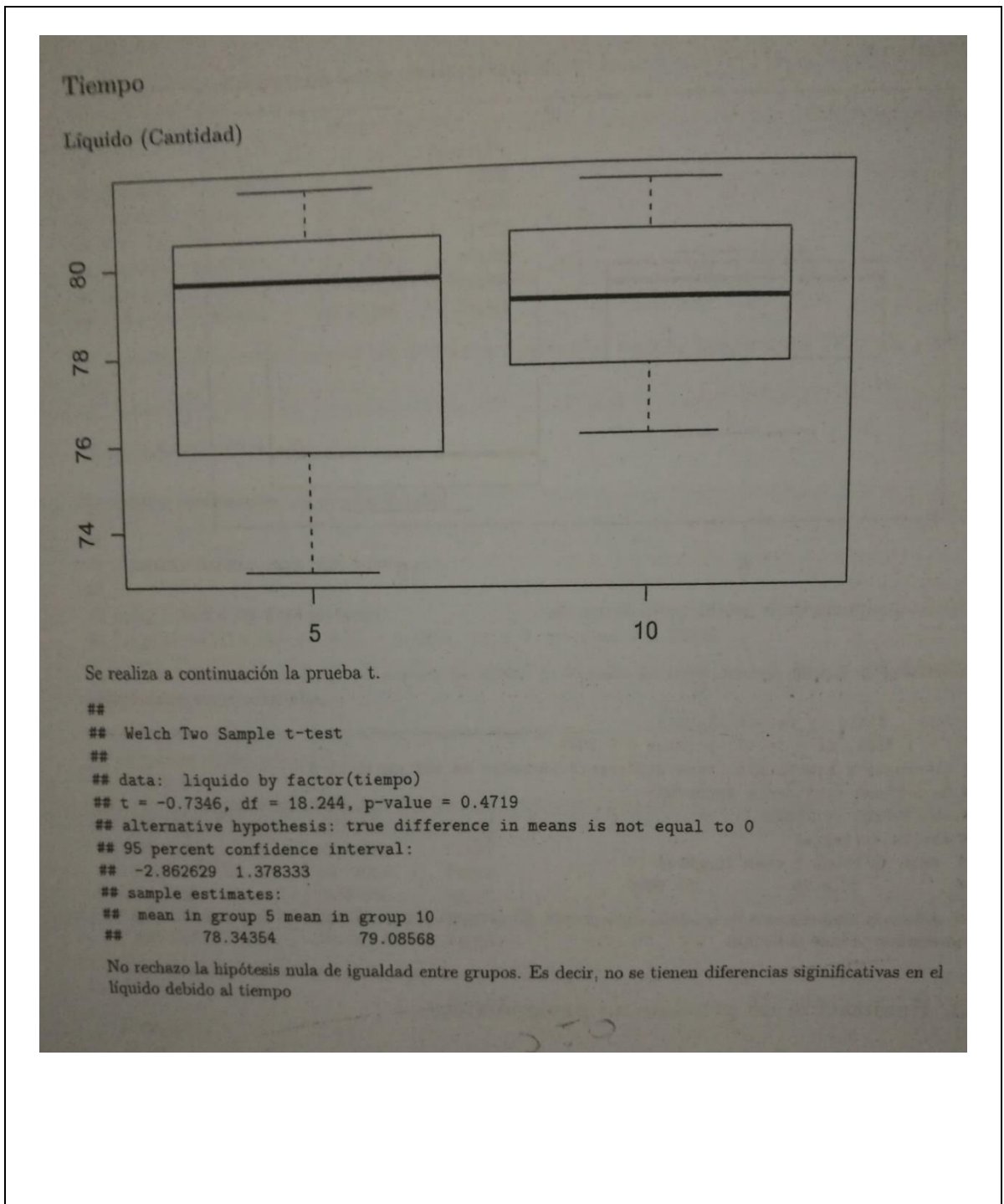


Continuación



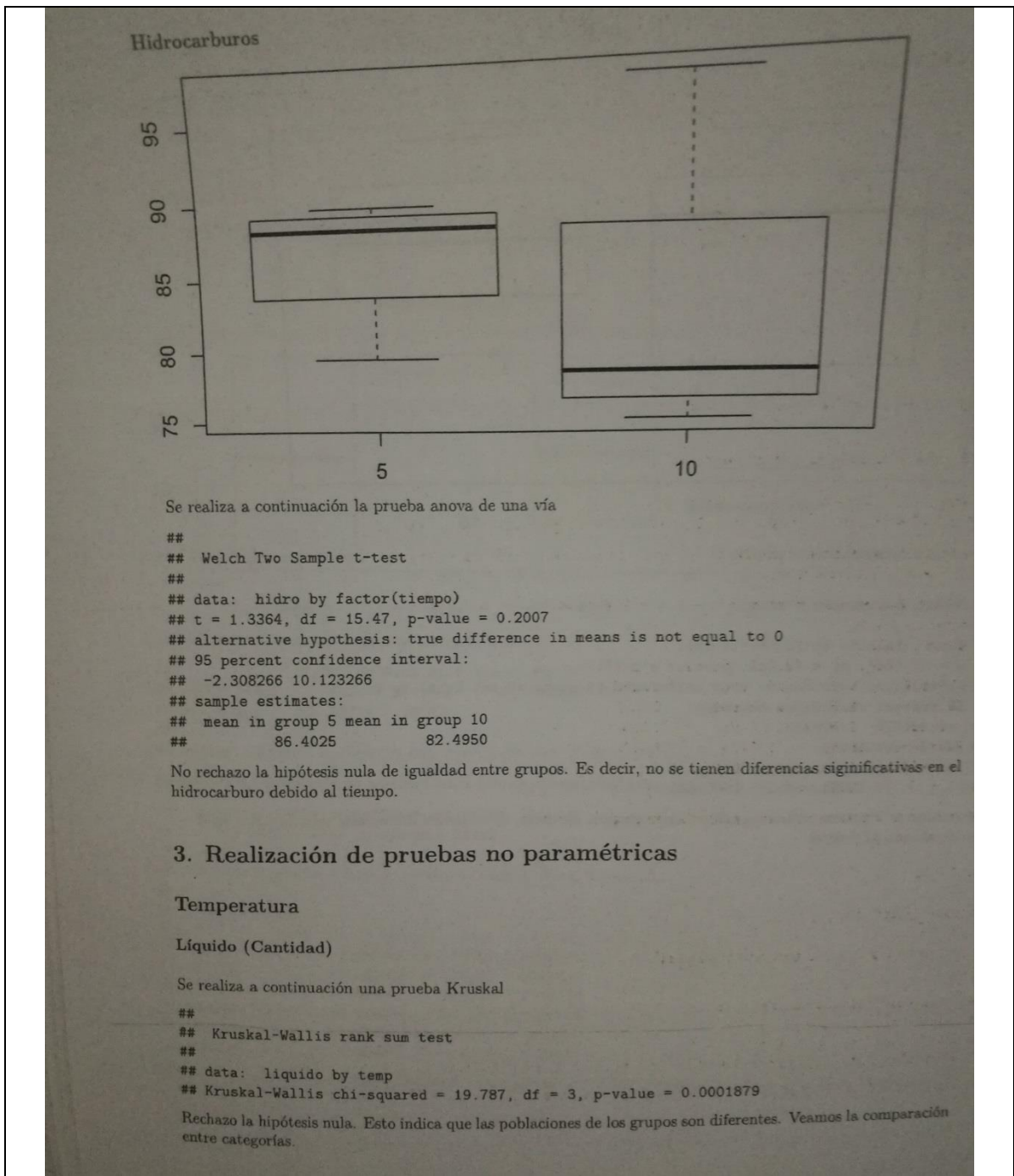
Notas	Categoría del diagrama	ESPOCH Realizado por: Nelson Núñez	Análisis estadístico		
			Escala	Fecha	Lámina
	a)Por aprobar b)Por calificar c)Por certificar		A4	2019	10

Continuación



Notas	Categoría del diagrama	ESPOCH Realizado por: Nelson Núñez	Análisis estadístico		
			Escala	Fecha	Lámina
	a)Por aprobar b)Por calificar c)Por certificar		A4	2019	11

Continuación



3. Realización de pruebas no paramétricas

Temperatura

Líquido (Cantidad)

Se realiza a continuación una prueba Kruskal

```
##
## Kruskal-Wallis rank sum test
##
## data: liquido by temp
## Kruskal-Wallis chi-squared = 19.787, df = 3, p-value = 0.0001879
```

Rechazo la hipótesis nula. Esto indica que las poblaciones de los grupos son diferentes. Veamos la comparación entre categorías.

Notas	Categoría del diagrama	ESPOCH Realizado por: Nelson Núñez	Análisis estadístico		
			Escala	Fecha	Lámina
	a) Por aprobar b) Por calificar c) Por certificar		A4	2019	12

Continuación

```
## Multiple comparison test after Kruskal-Wallis
## p.value: 0.05
## Comparisons
##      obs.dif critical.dif difference
## 375-400 17.333333    10.77064     TRUE
## 375-425  6.666667    10.77064     FALSE
## 375-450 12.000000    10.77064     TRUE
## 400-425 10.666667    10.77064     FALSE
## 400-450  5.333333    10.77064     FALSE
## 425-450  5.333333    10.77064     FALSE
```

Esta prueba indica que únicamente hay diferencias significativas entre las temperaturas 375 y 400, y 375 y 425.

**Hidrocarburos (Calidad)**

Se realiza a continuación una prueba Kruskal

```
##
## Kruskal-Wallis rank sum test
##
## data: hidro by factor(temp)
## Kruskal-Wallis chi-squared = 9.3095, df = 3, p-value = 0.02545
```

Rechaza la hipótesis nula. Esto indica que el parámetro de locación de los grupos son diferentes. Veamos la comparación entre categorías.

```
## Multiple comparison test after Kruskal-Wallis
## p.value: 0.05
## Comparisons
##      obs.dif critical.dif difference
## 375-400   9.0    10.77064     FALSE
## 375-425   1.5    10.77064     FALSE
## 375-450   1.5    10.77064     FALSE
## 400-425  10.5    10.77064     FALSE
## 400-450  10.5    10.77064     FALSE
## 425-450   0.0    10.77064     FALSE
```

No se encuentran diferencias significativas dentro de los grupos.

**Tiempo**

**Líquido (Cantidad)**

Se realiza a continuación una prueba Kruskal

```
##
## Kruskal-Wallis rank sum test
##
## data: liquido by tiempo
## Kruskal-Wallis chi-squared = 0.03, df = 1, p-value = 0.8625
```

No rechazo la hipótesis nula. Esto indica que las poblaciones de los grupos no son diferentes.

Notas	Categoría del diagrama	ESPOCH Realizado por: Nelson Núñez			
	a)Por aprobar b)Por calificar c)Por certificar		Escala	Fecha	Lámina
			A4	2019	13



Continuación

Hidrocarburos (Calidad)

Se realiza a continuación una prueba Kruskal

```
##
## Kruskal-Wallis rank sum test
##
## data: hidro by tiempo
## Kruskal-Wallis chi-squared = 4.381, df = 1, p-value = 0.03634
```

Rechazo la hipótesis nula. Esto indica que el parámetro de locación de los grupos son diferentes.

4. Pruebas robustas

Temperatura

Líquido (Cantidad)

```
## Call:
## tiway(formula = liquido ~ temp, data = datos)
##
## Test statistic: F = 12.1951
## Degrees of freedom 1: 3
## Degrees of freedom 2: 6.11
## p-value: 0.00547
##
```

## Explanatory measure of effect size: 0.98

Rechazo la hipótesis nula de igualdad entre grupos. Veamos las diferencias entre grupos

```
## Call:
## lincon(formula = liquido ~ temp, data = datos)
##
##          psihat ci.lower ci.upper p.value
## 375 vs. 400 -5.82057 -9.75934 -1.88179 0.00243
## 375 vs. 425 -3.64591 -7.87301  0.58118 0.01968
## 375 vs. 450 -4.78928 -8.74058 -0.83798 0.00555
## 400 vs. 425  2.17465  0.08167  4.26763 0.00999
## 400 vs. 450  1.03129 -1.23943  3.30200 0.14733
## 425 vs. 450 -1.14337 -3.12682  0.84009 0.06910
```

No hay diferencias significativas en las temperaturas 400 y 450 ni en 425 y 450.

Hidrocarburos (Calidad)

```
## Call:
## tiway(formula = hidro ~ temp, data = datos)
##
## Test statistic: F = 5.3536
## Degrees of freedom 1: 3
## Degrees of freedom 2: 5.02
## p-value: 0.0507
##
## Explanatory measure of effect size: 0.72
```

Notas	Categoría del diagrama	ESPOCH Realizado por: Nelson Núñez	Análisis estadístico		
			Escala	Fecha	Lámina
	a)Por aprobar b)Por calificar c)Por certificar		A4	2019	14

Continuación

Rechazo la hipótesis nula de igualdad entre grupos ( $\alpha = 0.6$ ). Veamos las diferencias entre grupos

```
## Call:
## lincon(formula = hidro - temp, data = datos)
##
##          psihat  ci.lower ci.upper p.value
## 375 vs. 400 -10.575 -34.13750 12.98750 0.13851
## 375 vs. 425  -0.540 -24.22406 23.14406 0.93338
## 375 vs. 450   3.240 -23.40359 29.88359 0.57035
## 400 vs. 425  10.035  -7.21477 27.28477 0.07704
## 400 vs. 450  13.815  -2.81302 30.44302 0.02247
## 425 vs. 450   3.780 -14.27433 21.83433 0.35436
```

Hay diferencias significativas en las temperaturas 400 y 450.

**Tiempo**

**Líquido (Cantidad)**

```
## Call:
## t1way(formula = liquido ~ tiempo, data = datos)
##
## Test statistic: F = 0.0636
## Degrees of freedom 1: 1
## Degrees of freedom 2: 11.64
## p-value: 0.80522
##
## Explanatory measure of effect size: 0.1
```

No rechazo la hipótesis nula de igualdad entre grupos.

**Hidrocarburos (Calidad)**

```
## Call:
## t1way(formula = hidro ~ tiempo, data = datos)
##
## Test statistic: F = 2.2819
## Degrees of freedom 1: 1
## Degrees of freedom 2: 9.84
## p-value: 0.1623
##
## Explanatory measure of effect size: 0.58
```

No rechazo la hipótesis nula de igualdad entre grupos.

**5. Medición de efectos en la respuesta**

En esta sección se evalúa el efecto en la variable de respuesta ante cambios en la temperatura y el tiempo

```
## Líquido
##
## Call:
## lm(formula = liquido ~ temp + tiempo, data = datos)
```

Notas	Categoría del diagrama	ESPOCH Realizado por: Nelson Núñez	Análisis estadístico		
			Escala	Fecha	Lámina
	a)Por aprobar b)Por calificar c)Por certificar		A4	2019	15

Continuación

```
##
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -3.4590 -1.1799 -0.5298  1.1717  3.9010
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept)  57.73304    6.42134   8.991 1.21e-08 ***
## temp         0.04817    0.01522   3.164 0.00467 **
## tiempo       0.14843    0.17018   0.872 0.39297
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 2.084 on 21 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.3391, Adjusted R-squared:  0.2761
## F-statistic: 5.387 on 2 and 21 DF,  p-value: 0.01293
El modelo es significativo (ver p-valor del estadístico F). Además, el efecto de la temperatura es significativo y el efecto del tiempo no lo es.
En promedio y manteniendo lo demás constante, por cada unidad que aumenta la temperatura, el porcentaje de líquido aumenta 4.8%.
Evaluemos un ajuste cuadrático para ver hasta dónde aporta positivamente la temperatura al porcentaje de líquido.
##
## Call:
## lm(formula = liquido - temp + I(temp^2) + tiempo, data = datos)
##
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -2.7372 -1.4556  0.0825  1.3621  2.7524
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept) -2.536e+02  9.561e+01  -2.652 0.01530 *
## temp         1.564e+00  4.652e-01   3.363 0.00309 **
## I(temp^2)    -1.838e-03  5.636e-04  -3.261 0.00391 **
## tiempo       1.484e-01  1.409e-01   1.053 0.30472
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 1.726 on 20 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.5685, Adjusted R-squared:  0.5038
## F-statistic: 8.783 on 3 and 20 DF,  p-value: 0.0006454
Los resultados indican que la temperatura aporta positivamente al porcentaje de líquido hasta 425.5 grados, después de este umbral, el aporte es negativo.

Hidrocarburos
##
## Call:
## lm(formula = hidro - temp + tiempo, data = datos)
##
```

Notas	Categoría del diagrama	ESPOCH Realizado por: Nelson Núñez	Análisis estadístico		
			Escala	Fecha	Lámina
	a)Por aprobar b)Por calificar c)Por certificar		A4	2019	16

```

## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -10.1883  -3.5278  -0.0938   1.4936  14.0773
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept) 122.90575   21.38122   5.748 1.05e-05 ***
## temp        -0.07902    0.05068  -1.559   0.134
## tiempo      -0.78150    0.56665  -1.379   0.182
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 6.94 on 21 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.171, Adjusted R-squared:  0.09209
## F-statistic: 2.166 on 2 and 21 DF, p-value: 0.1395

El modelo no es significativo.

```

Notas	Categoría del diagrama	ESPOCH Realizado por: Nelson Núñez	Análisis estadístico		
	a)Por aprobar b)Por calificar c)Por certificar		Escala	Fecha	Lámina
			A4	2019	17

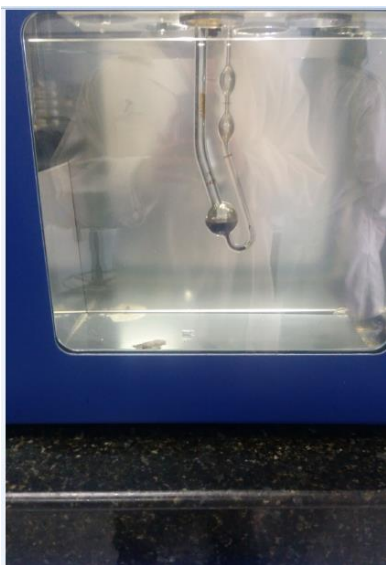


**ANEXO H.** Proceso de obtención de combustible por pirólisis térmica



Notas	Categoría del diagrama	ESPOCH Realizado por: Nelson Núñez	Proceso de obtención de combustible		
			Escala	Fecha	Lámina
	a) Por aprobar b) Por calificar c) Por certificar		A4	2019	18

**ANEXO I . Pruebas Físico Químicas del combustible obtenido**



Notas	Categoría del diagrama	ESPOCH Realizado por: Nelson Núñez	Pruebas físico químicas del producto		
			Escala	Fecha	Lámina
	a) Por aprobar b) Por calificar c) Por certificar		A4	2019	19

**ANEXO J. Factor de corrección de temperatura de destilación ASTM D86**

**CORRECCION DE TEMPERATURAS DE DESTILACION**

**Factor de correccion (Cc)**

tc	Cc	tc	Cc	tc	Cc	tc	Cc	tc	Cc	tc	Cc	tc	Cc
20	7,7	86	9,4	132	10,6	178	11,8	224	13,0	270	14,2	316	15,4
21	7,7	87	9,4	133	10,6	179	11,8	225	13,0	271	14,2	317	15,4
22	7,7	88	9,4	134	10,6	180	11,9	226	13,1	272	14,3	318	15,5
23	7,7	89	9,5	135	10,7	181	11,9	227	13,1	273	14,3	319	15,5
24	7,8	90	9,5	136	10,7	182	11,9	228	13,1	274	14,3	320	15,5
25	7,8	91	9,5	137	10,7	183	11,9	229	13,1	275	14,3	321	15,5
26	7,8	92	9,5	138	10,8	184	12,0	230	13,2	276	14,4	322	15,6
27	7,8	93	9,6	139	10,8	185	12,0	231	13,2	277	14,4	323	15,6
28	7,9	94	9,6	140	10,8	186	12,0	232	13,2	278	14,4	324	15,6
29	7,9	95	9,6	141	10,8	187	12,0	233	13,2	279	14,4	325	15,6
30	7,9	96	9,7	142	10,9	188	12,1	234	13,3	280	14,5	326	15,7
31	8,0	97	9,7	143	10,9	189	12,1	235	13,3	281	14,5	327	15,7
32	8,0	98	9,7	144	10,9	190	12,1	236	13,3	282	14,5	328	15,7
33	8,0	99	9,7	145	10,9	191	12,1	237	13,3	283	14,5	329	15,7
34	8,0	100	9,8	146	11,0	192	12,2	238	13,4	284	14,6	330	15,8
35	8,1	101	9,8	147	11,0	193	12,2	239	13,4	285	14,6	331	15,8
36	8,1	102	9,8	148	11,0	194	12,2	240	13,4	286	14,6	332	15,8
37	8,1	103	9,8	149	11,0	195	12,2	241	13,4	287	14,6	333	15,9
38	8,1	104	9,9	150	11,1	196	12,3	242	13,5	288	14,7	334	15,9
39	8,2	105	9,9	151	11,1	197	12,3	243	13,5	289	14,7	335	15,9
40	8,2	106	9,9	152	11,1	198	12,3	244	13,5	290	14,7	336	15,9
41	8,2	107	9,9	153	11,1	199	12,3	245	13,6	291	14,8	337	16,0
42	8,2	108	10,0	154	11,2	200	12,4	246	13,6	292	14,8	338	16,0
43	8,3	109	10,0	155	11,2	201	12,4	247	13,6	293	14,8	339	16,0
44	8,3	110	10,0	156	11,2	202	12,4	248	13,6	294	14,8	340	16,0
45	8,3	111	10,0	157	11,2	203	12,5	249	13,7	295	14,9	341	16,1
46	8,3	112	10,1	158	11,3	204	12,5	250	13,7	296	14,9	342	16,1
47	8,4	113	10,1	159	11,3	205	12,5	251	13,7	297	14,9	343	16,1
48	8,4	114	10,1	160	11,3	206	12,5	252	13,7	298	14,9	344	16,1
49	8,4	115	10,2	161	11,4	207	12,6	253	13,8	299	15,0	345	16,2
50	8,4	116	10,2	162	11,4	208	12,6	254	13,8	300	15,0	346	16,2
51	8,5	117	10,2	163	11,4	209	12,6	255	13,8	301	15,0	347	16,2
52	8,5	118	10,2	164	11,4	210	12,6	256	13,8	302	15,0	348	16,2
53	8,5	119	10,3	165	11,5	211	12,7	257	13,9	303	15,1	349	16,3
54	8,6	120	10,3	166	11,5	212	12,7	258	13,9	304	15,1	350	16,3
55	8,6	121	10,3	167	11,5	213	12,7	259	13,9	305	15,1	351	16,3
56	8,6	122	10,3	168	11,5	214	12,7	260	13,9	306	15,1	352	16,4
57	8,6	123	10,4	169	11,6	215	12,8	261	14,0	307	15,2	353	16,4
58	8,7	124	10,4	170	11,6	216	12,8	262	14,0	308	15,2	354	16,4
59	8,7	125	10,4	171	11,6	217	12,8	263	14,0	309	15,2	355	16,4
60	8,7	126	10,4	172	11,6	218	12,8	264	14,0	310	15,3	356	16,5
61	8,7	127	10,5	173	11,7	219	12,9	265	14,1	311	15,3	357	16,5
62	8,8	128	10,5	174	11,7	220	12,9	266	14,1	312	15,3	358	16,5
63	8,8	129	10,5	175	11,7	221	12,9	267	14,1	313	15,3	359	16,5
64	8,8	130	10,5	176	11,7	222	12,9	268	14,2	314	15,4	360	16,6
65	8,8	131	10,6	177	11,8	223	13,0	269	14,2	315	15,4	361	16,6

**T = Temperatura de destilación corregida  $T = tc + Cc$**   
**Cc = Factor de corrección  $Cc = 0,00012 \cdot (760 - P) \cdot (273 + tc)$**   
**tc = Temperatura experimental**  
**P = Presión barométrica (542 mmHg)**

Notas	Categoría del diagrama	ESPOCH Realizado por: Nelson Núñez	Factores de corrección de temperaturas de destilación ASTM D86		
			Escala	Fecha	Lámina
	a)Por aprobar b)Por calificar c)Por certificar		A4	2019	20