

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**TESIS**

**“OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO A PARTIR DE  
TEREFTALATO DE POLIETILENO MEDIANTE PROCESOS DE  
PIRÓLISIS”**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTADO POR**

**CARMONA CORONADO YERSON RICARDO  
ESPINOZA CHIRIBOGA JEAN PIERRE GAUDENCIO00**

**ASESOR**

**ING° JUAN TAUMATURGO MEDINA COLLANA**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**

**Callao, 2024**

**PERÚ**



# TESIS FINAL - CARMONA CORONADO- ESPINOZA CHIRIBOGA



Nombre del documento: TESIS FINAL - CARMONA CORONADO-ESPINOZA CHIRIBOGA.pdf  
ID del documento: c13b306bc72f89dfd37c2d39a45ae94d701e22a5  
Tamaño del documento original: 1,6 MB

Depositante: RQ PREGRADO UNIDAD DE INVESTIGACION  
Fecha de depósito: 22/1/2024  
Tipo de carga: interface  
fecha de fin de análisis: 22/1/2024

Número de palabras: 11.221  
Número de caracteres: 82.868

Ubicación de las similitudes en el documento:



## Fuentes de similitudes

### Fuentes principales detectadas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	<b>1library.co</b>   Obtención de combustible a partir de residuos plásticos mediante el ... <a href="https://1library.co/document/zgw504r7-obtención-combustible-partir-residuos-plásticos-media-nte-p...">https://1library.co/document/zgw504r7-obtención-combustible-partir-residuos-plásticos-media-nte-p...</a> 2 fuentes similares	4%		📄 Palabras idénticas: 4% (516 palabras)
2	<b>repositorioslatinoamericanos.uchile.cl</b>   Obtención de combustibles líquidos a pa... <a href="https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/2351787#:~:text=Las condiciones opera...">https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/2351787#:~:text=Las condiciones opera...</a> 2 fuentes similares	< 1%		📄 Palabras idénticas: < 1% (105 palabras)
3	<b>dspace.espoch.edu.ec</b>   Diseño de un prototipo de reactor de pirólisis térmica par... <a href="http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/15118/3/15T00768.pdf.txt">http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/15118/3/15T00768.pdf.txt</a> 2 fuentes similares	< 1%		📄 Palabras idénticas: < 1% (84 palabras)
4	<b>Documento de otro usuario</b> #86a959 📄 El documento proviene de otro grupo 3 fuentes similares	< 1%		📄 Palabras idénticas: < 1% (78 palabras)
5	<b>repositorio.uni.edu.pe</b>   Repositorio Institucional - UNI: Experimentación de la obt... <a href="https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/17060">https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/17060</a>	< 1%		📄 Palabras idénticas: < 1% (71 palabras)

### Fuentes con similitudes fortuitas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	<b>hdl.handle.net</b>   Influencia de la temperatura y el tamaño de partícula durante el ... <a href="http://hdl.handle.net/20.500.12894/7668">http://hdl.handle.net/20.500.12894/7668</a>	< 1%		📄 Palabras idénticas: < 1% (37 palabras)
2	<b>repositorio.ucv.edu.pe</b> <a href="https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/20.500.12692/116376/1/Carranza_VCM-Marreros_GJDLCH-...">https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/20.500.12692/116376/1/Carranza_VCM-Marreros_GJDLCH-...</a>	< 1%		📄 Palabras idénticas: < 1% (29 palabras)
3	<b>www.ecologiaverde.com</b>   TIPOS de PLÁSTICOS - Guía de Clasificación <a href="https://www.ecologiaverde.com/tipos-de-plasticos-1732.html">https://www.ecologiaverde.com/tipos-de-plasticos-1732.html</a>	< 1%		📄 Palabras idénticas: < 1% (30 palabras)
4	<b>localhost</b>   Obtención y caracterización de un combustible obtenido a partir de los... <a href="http://localhost:8080/xmlui/bitstream/redu/g/39910/3/401-1352-Obtenc%20caracterizac%20combust%20obte...">http://localhost:8080/xmlui/bitstream/redu/g/39910/3/401-1352-Obtenc caracterizac combust obte...</a>	< 1%		📄 Palabras idénticas: < 1% (25 palabras)
5	<b>revistas.cientifica.edu.pe</b>   The issue of plastic use during the Covid-19 pandemic <a href="https://revistas.cientifica.edu.pe/index.php/southsustainability/article/download/733/750">https://revistas.cientifica.edu.pe/index.php/southsustainability/article/download/733/750</a>	< 1%		📄 Palabras idénticas: < 1% (26 palabras)

### Fuentes mencionadas (sin similitudes detectadas) Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

1	<a href="https://orcid.org/0000-0002-3625-8308">https://orcid.org/0000-0002-3625-8308</a>
2	<a href="https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112715">https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112715</a>
3	<a href="https://books.google.com.pe/books?hl=en&amp;lr=&amp;id=jxilUUn4_QAC&amp;oi=fnd&amp;pg">https://books.google.com.pe/books?hl=en&amp;lr=&amp;id=jxilUUn4_QAC&amp;oi=fnd&amp;pg</a>
4	<a href="https://books.google.es/books?hl=es&amp;lr=&amp;id=Fe0FEAAQBAJ&amp;oi=fnd&amp;pg=P">https://books.google.es/books?hl=es&amp;lr=&amp;id=Fe0FEAAQBAJ&amp;oi=fnd&amp;pg=P</a>
5	<a href="https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121099">https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121099</a>

## **INFORMACIÓN BÁSICA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**TÍTULO** : “Obtención de combustible líquido a partir de tereftalato de polietileno mediante procesos de pirólisis”

**AUTOR(ES) / CÓDIGO ORCID / DNI:**

Yerson Ricardo Carmona Coronado/ Código ORCID (0009–0009–5046–1503) / DNI: 73619875

Jean Pierre Gaudencio Espinoza Chiriboga/ Código ORCID (0009–0009–2268–737X) / DNI: 72643982

**ASESOR/ CÓDIGO ORCID / DNI:**

Dr Juan Taumaturgo Medina Collana / 0000-0002–3625–8308 / 06213328

**LUGAR DE EJECUCIÓN** : Calle las Palmeras Urb. Las Fresas – Callao

**UNIDAD DE ANÁLISIS** : Proceso de pirólisis a partir de tereftalato de polietileno

**TIPO DE INVESTIGACIÓN** : Aplicada

**ENFOQUE** : Cuantitativo

**DISEÑO** : Experimental factorial

**TEMA OCDE** : Ingeniería de Procesos



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**XI CICLO DE TESIS**  
**JURADO DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**

**ACTA N° 127 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS CON CICLO DE TESIS**  
**PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO**

**LIBRO 01 FOLIO N° 128 ACTA N° 127 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS CON CICLO DE TESIS**  
**PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO**

A los 23 días del mes de enero del año 2024, siendo las 18:41 horas, se reunieron, en la sala meet: <https://meet.google.com/xch-ftwq-dpj>, el JURADO DE SUSTENTACION DE TESIS para la obtención del TÍTULO profesional de Ingeniero Químico de la Facultad de Ingeniería Química, conformado por los siguientes docentes ordinarios de la Universidad Nacional del Callao:

Ing. SANEZ FALCON LIDA CARMEN	PRESIDENTE
Ing. RODRIGUEZ VILCHEZ RICARDO	SECRETARIO
Lic. CABRERA ARISTA CESAR	MIEMBRO
Ing. MEDINA COLLANA JUAN TAUMATURGO	ASESOR

Se dio inicio al acto de sustentación de la tesis de los bachilleres **CARMONA CORONADO YERSON RICARDO** y **ESPINOZA CHIRIBOGA JEAN PIERRE GAUDENCIO**, quienes habiendo cumplido con los requisitos para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico, sustentan la tesis titulada "**OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO A PARTIR DE TEREFTALATO DE POLIETILENO MEDIANTE PROCESOS DE PIRÓLISIS**", cumpliendo con la sustentación en acto público, de manera no presencial a través de la Plataforma Virtual;

Con el quórum reglamentario de ley, se dio inicio a la sustentación de conformidad con lo establecido por el Reglamento de Grados y Títulos vigente. Luego de la exposición, y la absolución de las preguntas formuladas por el Jurado de Sustentación y efectuadas las deliberaciones pertinentes, acordó: Dar por **APROBADO** con la escala de calificación cualitativa **MUY BUENO** y calificación cuantitativa **DIECISIETE (17)**, la presente Tesis, conforme a lo dispuesto en el Art. 24 del Reglamento de Grados y Títulos de la UNAC, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N° 150-2023-CU del 30 de junio de 2023.

Se dio por concluida la sustentación a las 19:07 horas del día 23 de enero del año en curso.

Ing. Dra. SANEZ FALCON LIDA CARMEN  
PRESIDENTE DE JURADO DE SUSTENTACIÓN

Ing. Mg. RODRIGUEZ VILCHEZ RICARDO  
SECRETARIO DE JURADO DE SUSTENTACIÓN

Lic. Mg. CABRERA ARISTA CESAR  
MIEMBRO DE JURADO DE SUSTENTACIÓN

Ing. Dr. MEDINA COLLANA JUAN TAUMATURGO  
ASESOR DE JURADO DE SUSTENTACIÓN

## **DEDICATORIA**

A mi abuelita Mechi y a mi pequeña hermana por inspirarme y apoyarme de manera incondicional siempre.

Y.C.C.

A mis padres y familiares por el apoyo brindado en todo momento.

J.E.C.

## **AGRADECIMIENTO**

Principalmente a Dios, por inspirarnos y guiarnos a lo largo de nuestra formación profesional.

A nuestra alma Mater, la Universidad Nacional del Callao, y a nuestros docentes de la Facultad de Ingeniería Química quienes han compartido sus conocimientos.

A nuestra familia por el impulso que nos dieron para no rendirnos y hoy llegar a este punto de nuestras vidas.

# ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS .....	3
ÍNDICE DE FIGURAS.....	4
ÍNDICE DE ABREVIATURAS .....	5
RESUMEN.....	6
ABSTRACT .....	7
INTRODUCCIÓN .....	8
<b>I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>9</b>
<u>1.1. Descripción de la realidad problemática .....</u>	<u>9</u>
<u>1.2. Formulación del problema (problema general y específicos)</u> <u>Problema general .....</u>	<u>9</u>
<u>1.3. Objetivos (general y específicos).....</u>	<u>10</u>
<u>1.4. Justificación .....</u>	<u>10</u>
<u>1.5. Delimitantes de la investigación (teórica, temporal y espacial)...</u>	<u>11</u>
<u>1.5.1. Teórica.....</u>	<u>11</u>
<u>1.5.2. Temporal .....</u>	<u>11</u>
<u>1.5.3. Espacial .....</u>	<u>11</u>
<b>II. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>12</b>
<u>2.1. Antecedentes: Internacional y nacional .....</u>	<u>12</u>
<u>2.1.1. Antecedentes internacionales .....</u>	<u>12</u>
<u>2.1.2. Antecedentes nacionales .....</u>	<u>14</u>
<u>2.2. Bases teóricas .....</u>	<u>16</u>
<u>2.2.1. El mercado de combustibles líquidos en el Perú .....</u>	<u>16</u>
<u>2.2.2. Tereftalato de polietileno (PET) .....</u>	<u>16</u>
<u>2.2.3. Polímeros .....</u>	<u>17</u>
<u>2.2.4. Plásticos.....</u>	<u>18</u>
<u>2.2.5. Clasificación y tipos de plásticos .....</u>	<u>18</u>
<u>2.2.6. Pirólisis.....</u>	<u>20</u>
<u>2.2.7. Tipos de pirólisis .....</u>	<u>21</u>
<u>2.2.8. Factores que afectan la pirólisis.....</u>	<u>23</u>
<u>2.3. Marco conceptual.....</u>	<u>24</u>
<u>2.3.1. Pirólisis lenta .....</u>	<u>24</u>
<u>2.3.2. Temperatura de reacción .....</u>	<u>25</u>
<u>2.3.3. Condensación .....</u>	<u>25</u>

2.3.4. Rendimiento de reacción de pirólisis .....	25
2.3.5. Tiempo de reacción .....	26
2.3.6. Producto obtenido de la pirólisis .....	26
2.4. Definición de términos básicos .....	26
<b>III. HIPÓTESIS Y VARIABLES .....</b>	<b>29</b>
3.1. Hipótesis (general y específicas) .....	29
3.1.1. Operacionalización de variable.....	29
<b>IV. METODOLOGÍA DEL PROYECTO.....</b>	<b>31</b>
4.1. Diseño metodológico .....	31
4.1.1. Tipo de investigación .....	31
4.1.2. Diseño de investigación .....	31
4.2. Método de investigación.....	32
4.3. Población y muestra .....	33
4.3.1. Población .....	33
4.3.2. Muestra .....	34
4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado .....	34
4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos de la ..... información.....	34
4.5.1. Técnicas para la recolección de información .....	34
4.5.2. Instrumentos para la recolección de datos.....	34
4.6. Análisis y procesamiento de datos.....	35
4.7. Aspectos éticos en la investigación .....	35
<b>V. RESULTADOS.....</b>	<b>36</b>
5.1. Resultados descriptivos .....	36
5.2. Resultados inferenciales .....	37
<b>VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>40</b>
6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los ..... resultados .....	¡Error! Marcador no definido.
6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares ...	41
6.3. Responsabilidad ética de acuerdo con los reglamentos ..... vigentes .....	42
<b>VII.CONCLUSIONES.....</b>	<b>43</b>
<b>VIII.RECOMENDACIONES .....</b>	<b>44</b>
<b>IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>45</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	Tipos de plásticos según material de composición .....	17
<b>Tabla 2</b>	Clasificación de los plásticos .....	19
<b>Tabla 3</b>	Tipos de plásticos según material de composición .....	20
<b>Tabla 4</b>	Origen de los residuos plásticos producto del pirólisis .....	22
<b>Tabla 5</b>	Producción de productos gaseosos y líquidos .....	24
<b>Tabla 6</b>	Características del combustible líquido .....	27
<b>Tabla 7</b>	Operacionalización de variables .....	30
<b>Tabla 8</b>	Niveles de factores.....	32
<b>Tabla 9</b>	Diseño experimental .....	33
<b>Tabla 10</b>	Registro de la variable respuesta .....	33
<b>Tabla 11</b>	Primera corrida experimental.....	36
<b>Tabla 12</b>	Segunda corrida experimental.....	36
<b>Tabla 13</b>	Tercera corrida experimental.....	37
<b>Tabla 14</b>	Análisis de varianza .....	37

# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Evolución de la cantidad de demanda de combustibles líquidos en MBPD (2016- 2021) .....	16
<b>Figura 2</b> Etapas de investigación consideradas.....	31
<b>Figura 3</b> Media fracción líquida en base a la temperatura.....	38
<b>Figura 4</b> Media fracción líquida en base al tiempo.....	38
<b>Figura 5</b> Fracciones producto a 500°C en base al tiempo.....	39
<b>Figura 6</b> Fracciones producto a 550°C en base al tiempo.....	39
<b>Figura 7</b> Fracciones producto a 600°C en base al tiempo.....	40

# ÍNDICE DE ABREVIATURAS

PET	:	Tereftalato de polietileno
PE – AD	:	Polietileno de alta densidad
PE – BD	:	Polietileno de baja densidad
V	:	Vinilo
PVC	:	Policloruro de vinilo
PP	:	Polipropileno
PS	:	Poliestireno
PC	:	Policarbonato
pH	:	Potencial de hidrógeno
MBPD	:	Miles de barriles por día

## RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo obtener un combustible líquido a partir del tereftalato de polietileno mediante proceso de pirolisis. La metodología utilizada es de tipo experimental a nivel de laboratorio para obtener parámetros de operación óptimo de temperatura y tiempo de reacción de pirolisis. Se utilizaron diferentes niveles que determinaron la mayor conversión de producción de combustible líquido y reducción en las generaciones de productos gaseosos y residuos sólidos, bajo una atmosfera controlada de oxígeno a partir del tereftalato de polietileno mediante un tratamiento previo de lavado, secado y reducción de tamaño. Así mismo se determinó el porcentaje de conversión de combustible líquido después del proceso pirolítico por el método de pesado. Los resultados muestran un alto grado de conversión mayor de 4% a temperaturas a diferentes niveles de temperatura 500°C, 550°C y 600°C, con una velocidad de gradiente de temperatura de 30°C – 35°C /minuto. Asimismo, se obtuvieron un porcentaje de conversión de 14% en promedio a temperatura de 550°C y tiempo de reacción de 60 minutos. Se concluye que el proceso de pirolisis aplicado al tereftalato de polietileno bajo condiciones determinadas de temperatura y tiempo de reacción genera la conversión de combustible líquido deseado.

**Palabras clave:** Tereftalato de polietileno, pirolisis, combustible líquido.

## ABSTRACT

The objective of this work was to obtain a liquid fuel from polyethylene terephthalate through a pyrolysis process. The methodology used is experimental at the laboratory level to obtain optimal operating parameters of temperature and pyrolysis reaction time. Different levels were used that determined the greatest conversion of liquid fuel production and reduction in the generations of gaseous products and solid waste, under a controlled atmosphere of oxygen from polyethylene terephthalate through a prior treatment of washing, drying and size reduction. Likewise, the percentage of liquid fuel conversion after the pyrolytic process was determined by the weighing method. The results show a high degree of conversion greater than 4% at temperatures at different temperature levels 500°C, 550°C and 600°C, with a temperature gradient speed of 30°C – 35°C/minute. Likewise, a conversion percentage of 14% on average was obtained at a temperature of 550°C and a reaction time of 60 minutes. It is concluded that the pyrolysis process applied to polyethylene terephthalate under certain conditions of temperature and reaction time generates the desired liquid fuel conversion.

**Key words:** Polyethylene Terephthalate, Pyrolysis, Liquid fuel.

## INTRODUCCIÓN

El principal problema a nivel mundial que ha surgido en los últimos años es la dependencia principalmente de los combustibles fósiles. Durante estos últimos 60 años, el petróleo se ha incrementado de manera exponencial que converge con el incremento poblacional y económico (40), siendo uno de los recursos con mayor demanda, estimándose aportan un 80% de la energía mundial en electricidad, calor y transporte, otorgando también a sus derivados importancia y adecuación en diversos campos (33)

Se destina anualmente cerca del 5% de la de extracción de los combustibles fósiles a la producción de plásticos (32) y se estima que esta extracción alcanzaría un 20% para el año 2050 (9)

De los residuos plásticos generados en Perú, se aproxima que un 49% vendría solo de Lima Metropolitana y el Callao, de los cuales más del 35% de estos no cuentan una correcta disposición (29) El trabajo de investigación que se presenta busca obtener un valor agregado de los residuos plásticos al obtener combustibles líquidos.

## **I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1. Descripción de la realidad problemática**

Hoy en día, el petróleo desempeña un papel crucial como recurso energético y contribuye al desarrollo económico de las naciones (40), el 99% de los plásticos se producen a partir de petróleo crudo y gas natural extraídos como su principal materia prima (49)

En los últimos seis años, se han observado fluctuaciones en la producción nacional de artículos de plástico. Entre 2013 y 2018, se registró un aumento del 11,2% en la fabricación de productos plásticos en 2013, manteniendo un crecimiento promedio anual del 2,2% (18)

Los plásticos, derivados de petróleo y gas natural, plantean un desafío ambiental global al acumularse en ecosistemas y organismos a través de microplásticos y macroplásticos (32), Aunque en nuestro país se han implementado medidas para reducir la producción y consumo de plásticos de un solo uso, la pandemia de la covid – 19 ha tenido un impacto contrario (15), porque el aumento en el consumo de plástico conlleva a un incremento proporcional de residuos sólidos (46)

Existen enfoques y tácticas para gestionar el impacto de los plásticos, como la estrategia de las 4R, que abarca la reducción, reutilización, reciclaje y recuperación (22) A pesar de ello, la transformación de desechos plásticos en combustible se percibe como una solución promisoría, factible a través de varios métodos convencionales de refinería, destacando entre ellos la tecnología de pirólisis (21)

### **1.2. Formulación del problema (problema general y específicos)**

#### **Problema general**

¿Cómo se obtendrá combustible líquido con alto rendimiento de conversión a partir de tereftalato de polietileno mediante procesos de pirólisis?

#### **Problemas específicos**

- 1) ¿Cuál será la temperatura del proceso de pirólisis del tereftalato de polietileno para la obtención de combustible líquido?**

- 2) ¿Cuál será el tiempo de reacción para la obtención de combustible líquido obtenido a partir del tereftalato de polietileno mediante el proceso de pirólisis?

### **1.3. Objetivos (general y específicos)**

#### **Objetivo general**

Obtener combustible líquido con alto rendimiento de conversión a partir del tereftalato de polietileno mediante el proceso de pirólisis

#### **Objetivos específicos**

- 1) Determinar la temperatura del proceso de pirólisis del tereftalato de polietileno para la obtención de combustible líquido.
- 2) Determinar el tiempo de reacción para la obtención de combustible líquido obtenido a partir del tereftalato de polietileno mediante el proceso de pirólisis

### **1.4. Justificación**

Esta investigación se fundamenta en su capacidad para generar efectos positivos en los siguientes aspectos: ambiental, económica y educativa.

Perú cuenta con extensas reservas de combustibles fósiles, utilizados no solo como fuente de energía, sino también en la producción creciente de plásticos, generando una problemática considerable en la gestión de residuos sólidos debido a la actual demanda. Ante esto, se propone la aplicación de la ingeniería química para procesar y transformar estos residuos sólidos en productos útiles, como la obtención de combustible, ofreciendo beneficios económicos y una solución para mitigar la contaminación por desechos plásticos.

El estudio realizado se abordó con el objetivo de obtener combustible líquido a partir del pirólisis del Tereftalato de Polietileno, que se llevó a cabo en un reactor diseñado específicamente para este propósito. Se emplearon equipos e instrumentos de medición para trabajar con parámetros controlados, asegurando así una recopilación de datos precisa. El combustible líquido resultante fue analizado en un laboratorio externo (Caleb Brett) para su caracterización.

## **1.5. Delimitantes de la investigación (teórica, temporal y espacial)**

### **1.5.1. Teórica**

Para el presente trabajo de investigación se requirió información teórica sobre procesos de pirolisis, característica fisicoquímica y propiedades químicas del tereftalato de polietileno, degradación térmica de compuestos plásticos, equipos de laboratorio según aplicación y eficiencia, característica y tipos de combustibles destilados de la obtención final de pirolisis.

### **1.5.2. Temporal**

La investigación se realizó durante los meses comprendidos de julio a noviembre del 2023

### **1.5.3. Espacial**

La presente investigación fue desarrollada con el equipo y materiales propios instalados en la calle Las Palmera Urb. Las Fresas de la provincia constitucional del Callao y los análisis fisicoquímicos fueron realizados en un laboratorio externo certificado.

## **II. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Antecedentes: Internacional y nacional**

#### **2.1.1. Antecedentes internacionales**

En el trabajo de investigación “Obtención de combustible a partir de residuos plásticos mediante el proceso de pirolisis”, se evaluó el rendimiento de la producción de combustible líquido utilizando cinco tipos de plásticos, independientemente: PET, HDPE, LDPE, PP Y PS. Las pruebas experimentales se realizaron con muestras de 500 g. El proceso se realizó mediante pirolisis en un reactor tipo batch, teniendo como factor la temperatura a dos niveles: 350°C y 500°C. Mientras que el tiempo de residencia no se considera como factor influyente y se tomó el tiempo de residencia estándar de 30 minutos. Determinaron en los diferentes tipos de plásticos que el incremento de las temperaturas de 350°C a 500°C incremento el porcentaje de obtención de líquido entre un 6% y 14%. Se utilizó un diseño bifactorial con repeticiones (03) para la investigación. Resultando que el mayor porcentaje de fracción peso líquido de 4,5% en promedio se obtiene a temperatura de 500°C en un tiempo de 30 minutos para la muestra de PET (34)

En la tesis “Obtención y caracterización de un combustible obtenido a partir de los desechos del PET y Polipropileno” en la presente investigación se diseñó un reactor tipo batch para la realización de pirolisis. Las muestras fueron de 1 Kg en relación (1:9) PET Y PP respectivamente. El parámetro de temperatura en cada prueba experimental fue de 400°C seleccionado como estándar para esta investigación. El factor estudiado fue el tiempo de residencia se tomó tiempos de: 40 min, 50 min, 60 min y 70 min. Se obtuvo el mayor rendimiento del 94,33% de combustible líquido con menor contenido de residuos y menor contenido de gas, en un tiempo de residencia de 60 minutos. Para validar el combustible obtenido se determinó la caracterización fisicoquímica (se puede mencionar la gravedad específica 0,843; grados API 37,9; viscosidad cinemática 2,965) concluyendo a la obtención de Diesel tipo 2. (7)

En el artículo “Thermal pyrolysis of Polypropylene plastic waste into liquid fuel: Reactor performance evaluation” se compara la producción de combustible

líquido obtenido a diferentes temperaturas y tiempos. Se determinó como unidad de análisis el Polipropileno. Las pruebas se realizaron en un reactor tipo Batch donde se pesó 1 Kg para cada prueba experimental. Los parámetros evaluados fueron la temperatura y el tiempo de residencia. En la primera parte se realizó la pirolisis a temperatura de: 250°C, 300°C, 350°C y 400°C a un tiempo de residencia de 30 minutos. Logrando el mayor rendimiento de combustible líquido en un 80,14% a 400°C. En la segunda parte se realizó la pirolisis a las mismas temperaturas evaluadas, pero con un tiempo de residencia de 60 minutos. Donde se obtuvo el mayor rendimiento de obtención de combustible líquido en un 88,86% a 400°C. Por último se realizó estudio de propiedades fisicoquímicas donde se evaluaron la: densidad ( $796,9 \text{ Kg m}^{-3}$ ), viscosidad ( $1,5398 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$ ) y poder calorífico ( $44,95 \text{ MJ Kg}^{-1}$ ) del combustible líquido obtenido y se comparó con estándares de Gasolina y Diesel asemejándose como alternativa de combustible líquido (26)

En el artículo de investigación "Effect of Temperature on Pyrolysis Oil Using High-Density Polyethylene and Polyethylene Terephthalate Sources From Mobile Pyrolysis Plant" se estudió la variación de producción de combustible líquido comparadas para diferentes niveles de temperatura. Se estimó en el presente estudio que el PET obstruía los conductos y generaba mayor residuos y gases, mientras que el HDPE facilitaba la operación y se obtenían mejores resultados en cuanto rendimiento en el combustible líquido. Las pruebas se dieron en un reactor batch de 4,5 L Se generó para la temperatura a tres niveles: 400°C, 425°C y 450°C, donde se obtuvieron 22,5; 27 y 40,5 L por 100 Kg de HDPE respectivamente, evidenciando el efecto de la temperatura en la producción de combustible líquido. También menciona el efecto del tiempo de recolección en la variación de las densidades donde explican que las cadenas cortas se condensan antes que las cadenas largas, conclusión el combustible líquido tendrá mayor densidad y viscosidad a medida que pasa por mayor número de condensadores, lo cual compromete directamente al tiempo de condensación, así mismo a 450°C se demostró el efecto de la temperatura en la producción de combustible líquido, se pudo obtener las primeras muestras ni bien se alcanzó la temperatura, mientras que a 400°C y 425°C se obtuvo recién muestras de

combustible líquido entre los 10 y 20 minutos después de la primera recolección de muestra (36)

En el artículo de investigación “Conversion of polyethylene to high-yield fuel oil at low temperatures and atmospheric initial pressure” se estudió la transición de fase del estado sólido al estado líquido, indicando que las cadenas largas de hidrocarburos o sus polímeros tienen un cambio de entalpia mayores a los que ocurre en solidos metálicos regulares debido a la característica que los plásticos suelen comportarse como materiales de gran almacenamiento de energía en su estado sólido. La experimentación se realizó en un autoclave con capacidad de 100 mL y a una temperatura estándar de 380°C. Utilizando plástico tipo LDPE y aditivos como: 1-hexeno, 1-octeno, 1-deceno, octano y xileno evaluando solo o mixto una muestra de 11 g, se estudio el efecto de diferentes presiones iniciales usando el gas inerte de nitrógeno, helio y argón, observando los cambios de temperatura inducidos por transición de fase al apagarse el calentamiento del reactor, las presiones evaluadas para las muestras puras de LDPE fueron de : 1, 2, 3, 4, 5, 6, 11, 16 y 21 atm. Se tomaron muestras obtenidas para un análisis de productos gaseosos revelando que el aumento de presión de 2 a 21 atm se producían más porcentaje de alcanos que olefinas gaseosas, con una obtención de hasta 90% de conversión liquida de combustible (51).

### **2.1.2. Antecedentes nacionales**

En la tesis “ Influencia de la temperatura y el tamaño de partícula durante el proceso de pirolisis en el rendimiento del combustible líquido obtenido a partir de residuos del poliestireno expandido (EPS)” se realizó a diferentes temperaturas de 400°C, 450°C, 500°C y 550°C con una presión de vacío de 260 mm Hg a una baja tasa de calentamiento de 10°C/min utilizando dos tamaños diferentes de partículas de 0 - 5 y 6 – 10 mm, teniendo resultados óptimos de rendimiento de un: 97,8 % líquidos, 1,2% gases y 1,0% solidos a temperatura de 550°C y tamaño de partícula de 6 – 10 mm, finalmente se caracterizó el producto líquido y evaluó el uso del combustible para su utilización bajo un previo proceso adicional (47)

En la tesis “Obtención de combustibles líquidos a partir de residuos de polietileno de alta densidad” determinaron que las mejores condiciones experimentales

para obtener un buen rendimiento de productos líquidos son: Presión de operación a 34,66 kPa abs., una velocidad de calentamiento de  $\frac{20^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$ , temperatura de operación de 550°C y un tamaño de partícula de 4 a 6 cm. Con los cuales se obtiene un rendimiento de productos líquidos de 88%, 10% de gases y 2% de sólidos (residuo carbonoso) (39)

En la tesis “Obtención de combustibles líquidos a partir de residuos de polipropileno” se estudió las variables que alteran el proceso de pirólisis de residuos provenientes de polipropileno. Se estudió el efecto del tamaño de partícula del plástico y temperatura de operación en los rendimientos de productos líquidos; se contó con muestras de residuos de polipropileno de unos intervalos de tamaño de partícula cercanos a 0 mm hasta 8 mm. Las condiciones de operación fueron: Temperatura de reacción de pirolisis (Reactor) = 550°C, una presión de operación (Presión de vacío) = 260 mm Hg, velocidad de calentamiento =  $\frac{20^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$ , tamaño de partícula = de 2 a 4 mm, obteniéndose un porcentaje de líquidos del 88%, 2% para sólidos (residuo carbonoso) y un 10% de gases. Se pudo comprobar que el producto líquido obtenido tenía una composición de 30% de gasolina, 60% de diésel y 10% de lubricante por lo que puede ser utilizado junto a algún crudo como una carga para procesos de refinería (38)

En la tesis “Experimentación de la obtención de combustibles líquidos a partir del polietileno de alta densidad”, utilizaron polietileno de alta densidad post – urbano a diferentes tamaños 2 – 4 mm, 4 – 6 mm y 6 – 8 mm en un reactor tubular vertical a vacío con sistema de condensación de productos. Se operó a temperaturas de reactor de 530°C, 560°C y 590°C, variando el tamaño de partícula en los tres tamaños indicados. Las condiciones que maximizan la producción de combustible líquido en este estudio fueron: presión de 34,7 kPa abs,  $\frac{20^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$ , de velocidad de calentamiento, tamaño de partícula de 4 – 6 mm, y temperatura de reactor de 560°C. Los rendimientos obtenidos fueron: 89% líquidos, 7% gases y 3% sólidos (45)

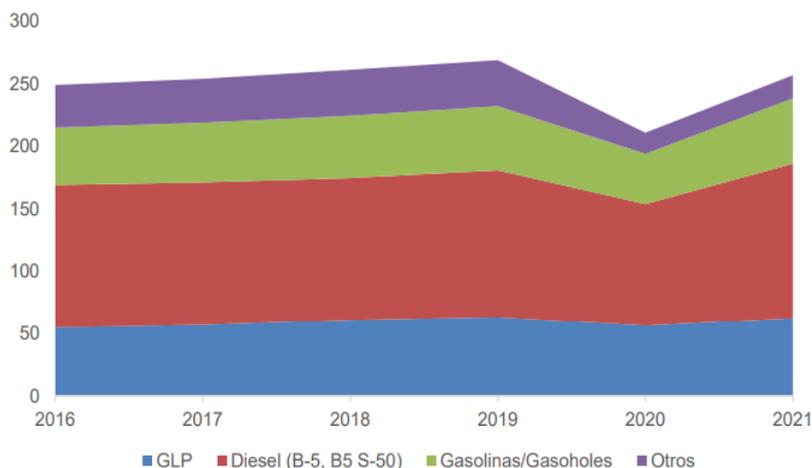
## 2.2. Bases teóricas

### 2.2.1. El mercado de combustibles líquidos en el Perú

El consumo energético es esencial para el progreso de actividades económicas, la creación de valor, el crecimiento económico y el bienestar de la población. Entre las fuentes de energía más importantes se encuentran las que están vinculadas con el petróleo, sus derivados y los líquidos del gas natural (hidrocarburos). En el Perú, el 63,5% del consumo total de energía es proveniente de estos productos. Los productos principales derivados del petróleo y de los líquidos del gas natural que se consumen en el Perú son el Diesel (cerca del 46% del consumo total de combustibles líquidos y GLP), el GLP (24%) y las gasolinas/gasoholes (20%) (19) Esto se puede apreciar en la **Figura 1**

**Figura 1**

**Evolución de la cantidad de demanda de combustibles líquidos en MBPD (2016 – 2021)**



Indecopi (2022)

### 2.2.2. Tereftalato de polietileno (PET)

Es un polímero plástico, el cual se encuentra dentro de la categoría de los termoplásticos, los cuales están compuestos por cadenas de polímeros lineales, mismos que tienden a fundirse o ablandarse a un determinado rango de temperatura (32) . Este plástico PET posee una densidad calórica de 5.550 Kcal/kg, se caracteriza por no contener aditivos ni agente modificadores como

resultado en la pirolisis térmica produce dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y vapor de agua (H<sub>2</sub>O) (8)

**Tabla 1**  
**Tipos de plásticos según material de composición**

Material	Contenido energético (Kcal/Kg)
Mezclas de plástico	8,902
Polietileno PE	10,529
Poliestireno PS	9,128
Poliuretano	6,524
PVC	5,547
PET	5,550
PP	S/D

**Cantor y Peña (2021)**

### **2.2.3. Polímeros**

Un polímero es una molécula de gran tamaño que está conformada por “eslabones” orgánicos denominados monómeros, unidos mediante enlaces covalentes en reacciones conocidas como polimerización (Beltrán, Marcilla 2012) En otros casos, las cadenas se ramifican o se interconectan, dando lugar a redes tridimensionales. La unidad que se repite en el polímero generalmente es idéntica o casi idéntica al monómero original. (6)

La extensión de la cadena del polímero se define por el número de unidades que se repiten en dicha cadena, conocido como grado de polimerización (DP). El peso molecular del polímero se calcula multiplicando el peso molecular de la unidad repetitiva por el grado de polimerización. La mayoría de los polímeros de alto rendimiento utilizados en plásticos, cauchos o fibras tienen pesos moleculares que oscilan entre 10 000 y 1 000 000 (6)

La clasificación de los polímeros según su origen. Se establecen dos categorías principales: polímeros naturales y polímeros sintéticos. Los polímeros naturales son aquellos que se encuentran en la naturaleza en su forma natural. Algunos ejemplos mencionados son la celulosa, que forma parte de las paredes celulares

de las plantas; el almidón, presente en alimentos como patatas y granos; las proteínas, que son componentes esenciales en los organismos vivos; el látex, una sustancia lechosa que se encuentra en ciertas plantas; y las resinas naturales, que son exudaciones de árboles y plantas (17)

Por otro lado, los polímeros sintéticos son fabricados por el ser humano a partir de diversas moléculas obtenidas del petróleo, gas natural, carbono y otros materiales. Ejemplos comunes de polímeros sintéticos mencionados son el polietileno, utilizado en bolsas de plástico y botellas; el polipropileno, ampliamente utilizado en envases y componentes automotrices; el PVC, empleado en tuberías y materiales de construcción; y el teflón, famoso por su uso en sartenes antiadherentes (17).

#### **2.2.4. Plásticos**

Los plásticos son polímeros, formados por moléculas de carbono que se encuentran unidas mediante enlaces covalentes. Se obtienen a partir de procesos de polimerizaciones, por reacciones de adición, en donde los monómeros se unen para obtener polímeros con cadenas lineales y cadenas tridimensionales. Son derivados del petróleo y se caracterizan por la facilidad de ser moldeable (14)

Los monómeros que pueden fabricarlos provienen de procesos de refinación y petroquímicos, se producen moléculas como etano, propano, etileno, propileno, etc., una vez teniendo las moléculas, se pueden hacer polímeros usando un catalizador para formar cadenas con diferentes pesos moleculares. El polímero es conformado por una cadena larga y flexible compuesta de unidades químicas, estos polímeros hacen que el plástico sea fácil de moldear cuando está caliente, lo que lo hace ideal para fabricar diferentes productos (23).

#### **2.2.5. Clasificación y tipos de plásticos**

Estos se pueden clasificar de acuerdo con las características y comportamiento térmico-mecánico que poseen, tal como se muestra en la **Tabla 2 (Ver pag. Nº 19)**

**Tabla 2**  
**Clasificación de los plásticos**

Tipos	Clasificación
Termoplásticos	Policloruro de Vinilo (PVC)
	Poliestireno
	Polietileno
	Polipropileno
	Polibuteno
Elastómeros	Cauchos
	Gomas
	Látex
	Polisopreno
Termoestables	Las resinas
	Fenoplasticos o plásticos de Fenol - formaldehído

***Figueroa y Chela (2021)***

- a) **Termoplásticos.** Plásticos que son calentados hasta alcanzar su punto de transición térmica más alta, se funden para poder darle una nueva forma y así sucesivamente, pero esto no puede repetirse tantas veces debido a que los plásticos reciclados tienen una calidad inferior comparado con un material nuevo o virgen (24)
- b) **Termoestables.** Plásticos que se solidifican al tener contacto con el calor, por lo que no pueden ser refundidos (4)
- c) **Elastómeros.** Son un tipo especial de polímero con propiedades únicas que los hacen muy elásticos y flexibles, tienen la capacidad de recuperar su forma original después de ser estirados o comprimidos (41)

En la **Tabla 3 (Ver pag. Nº 20)** se aprecia diferentes tipos de plásticos según su material de composición, a la vez que los productos que se obtienen de estos.

**Tabla 3**  
**Tipos de plásticos según material de composición**

Código de resina	Material	Productos
 PET	Polietileno Tereftalato (PET, PETE)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Botellas plásticas, enjuague bucal, envases de salsa de tomate y aderezo.</li> <li>• Frascos para mantequilla de maní y mermelada</li> <li>• Alfombras, correas, películas y molduras de ingeniería.</li> </ul>
 HDPE	Polietileno de alta densidad (PEAD, HDPE)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Envases para leche, agua, jugos, cosméticos, champú y detergentes.</li> <li>• Bolsas para alimentos.</li> <li>• Fundas de cereales y cubierta de alambre y cables.</li> </ul>
 PVC	Cloruro de polivinilo (PV, Vinyl)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PVC tuberías, marcos de ventana, vallas.</li> <li>• Bolsas de sangre y tubos médicos, aislamiento de hilos y cables, respaldo de alfombra y suelos.</li> </ul>
 LDPE	Polietileno de baja densidad (PE-BD, LDPE)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bolsas para alimentos congelados y envolturas para basura.</li> <li>• Recubrimientos para cartones de leche y vasos de bebidas calientes y frías. Tapas de contenedores y botes de basura.</li> <li>• Juguetes y tuberías</li> </ul>
 PP	Polipropileno (PP)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Envases de alimentos, contenedores para yogurt, margarina y comidas para llevar.</li> <li>• Botellas de medicamentos y cosméticos.</li> <li>• Tapas de botellas y cierres.</li> <li>• Aplicaciones en automóviles, tales como cajas de baterías, luces de señal, cables de batería, escobas y cepillos.</li> </ul>
 PS	Poliestireno (PS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Artículos como tazas, platos, cubiertos, recipientes con bisagras.</li> <li>• Cajas de discos compactos y botellas de aspirina.</li> <li>• Cámaras o cajas de cintas de video.</li> <li>• Molduras de plástico (como productos de reemplazo de madera).</li> </ul>
 OTROS	Otros	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esta elaborado con una resina de poliuretano (PU), acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), policarbonato (PC) y resina acetal.</li> <li>• Botellas de agua y algunas botellas de jugos cítricos.</li> <li>• Botellas y aplicaciones en mobiliario plástico.</li> <li>• Discos compactos y techo traslucido.</li> </ul>

**Pinagorte y Sanchez (2023)**

### 2.2.6. Pirólisis

La pirólisis es uno de los pocos métodos que pueden deconstruir plásticos mixtos en una lista más amplia de polímeros que los que actualmente son aptos para el reciclaje mecánico (48)

Se definiría como el proceso de degradación térmica de moléculas poliméricas de cadena larga en moléculas más pequeñas, menos moléculas complejas a

través del calor, calor intenso con poca duración y sin la presencia del oxígeno (42) La pirólisis es bien considerada por diversos investigadores ya que el rendimiento del proceso puede llegar a un 82% en peso, produciendo así cantidad considerable de aceite, esto a una temperatura de alrededor de los 500°C (3) Debido a esto se puede considerar que la pirólisis cuenta con un enfoque confiable y de sostenimiento para lograr su propósito doble al disminuir los residuos plásticos y complementar demanda que va en aumento de energía de las industrias petrolíferas (43)

Las condiciones de pirólisis, incluido el tamaño de partícula de la biomasa, la temperatura de pirólisis el tiempo de pirólisis, (37) Así como la velocidad con la que se caliente, el método de calentamiento (eléctrico, plasma o microondas), entre otros, influyen en las propiedades tanto físicas como químicas del producto obtenido (11)

Se observa que una de las variables operativas más relevantes en la pirólisis es la temperatura, debido a esto se puede controlar la reacción de craqueo de la cadena polimérica. Dependiendo al tipo de plástico, habrá una temperatura de degradación, por ejemplo, para los más comunes PET, HDPE, LDPE, PP y PS, la temperatura térmica inició en 350°C, salvo para el PVC que comenzó en 220°C; así mismo, si se desea un producto en estado gaseoso o sólido, se sugiera temperaturas sobre los 500°C, si se desea líquido, es recomendable una temperatura entre los 300°C – 500°C y esto aplica para todos los plásticos (42)

A continuación, en la **Tabla 4 (Ver pag. N° 22)** se puede apreciar de donde suele provenir los residuos plásticos, así mismo se aprecia los productos principales que se obtiene luego del proceso de pirólisis.

### **2.2.7. Tipos de pirólisis**

**a) Pirólisis lenta.**- La pirolisis lenta se caracteriza por la combustión parcial en atmosfera inerte mediante velocidades uniformes y lentas de  $\frac{10^{\circ}\text{C} - 15^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$  en rango de temperaturas de 400°C y 650°C (29)

**Tabla 4**  
**Origen de los residuos plásticos producto del pirólisis**

Tipor de resina	Principal origen de los residuos	Productos del pirólisis	Energía térmica de combustión calculada (Mj/Kg)	Energía térmica de combustión experimental (Mj/Kg)
Polietileno	Envases de plástico industriales, domésticos, plásticos agrícolas	sólido (0% – 20 % en peso), líquido (51% – 95% en peso), gases (4% – 32% en peso)	44,8 47,7	44,6 46,2
		sólido (0% – 20% en peso), líquido (51% – 95% en peso), gases (4% – 32% en peso)	44,8 45,8	44,6 46,4
Polipropileno	Embalajes domésticos, industriales, automotriz	sólido (0% – 20% en peso), líquido (51% – 95% en peso), gases (4% – 32% en peso)	44,8 45,8	44,6 46,4
Poliestireno	Envases plásticos domésticos, industriales, construcción, demolición, residuos de aparatos eléctricos y electrónicos	sólido (0% – 13% en peso), líquido (51-95 % en peso), gases (4% – 50% en peso)	40,2 37,7	40,0 42,5
		sólido (0% – 9% en peso), líquido (23% – 39% en peso), gases (52% – 77% en peso)	21,8 24,1	23,2 22,2
Poli (metacrilato de metilo)	Residuos de construcción, automotriz	de metacrilato de metilo (MMA) (86% – 98% en peso)	25,1 26,8	25,0 26,6
Tereftalato de polietileno	Envases de plástico para el hogar	sólido (0% – 9% en peso), líquido (23% – 39% en peso), gases (52% – 77% en peso)	21,8 24,1	23,2 22,2
Cloruro de polivinilo	Residuos plásticos municipales y de construcción	sólido (0% – 28% en peso), líquido (12% – 13% en peso) con mayoría de aromáticos, gases (arriba del 88% en peso) incluyendo HCl como mayor componente	16,4	-
Poliamida 6	Desechos automotrices	Caprolactama	30,5	30,2

**Soni (2021)**

**b) Pirólisis rápida.-** Es un proceso de tratamiento térmico sin oxígeno alcanzando temperaturas alrededor de 600°C y tasas de calentamiento

elevadas hasta  $\frac{1\ 000^{\circ}\text{C}}{\text{s}}$ , tiempos de 0,5 y 2 s descomponiendo rápidamente y obteniendo principalmente vapores, aerosoles y bajas cantidades de gas y carbón (Delgado 2021)

- c) Pirólisis flashN.-** Este proceso también es conocido como pirólisis muy rápida, esto debido a que implica unas velocidades de calentamiento mayores a  $\frac{1\ 000^{\circ}\text{C}}{\text{s}}$  y a una temperatura de reacción extremadamente alta, oscilando entre 900°C a 1 300°C (25)

### 2.2.8. Factores que afectan la pirólisis

Los principales factores que afectan el proceso de pirólisis y la composición del producto final son los siguientes:

- a) Temperatura.-** La importancia de la temperatura como una variable operativa clave en el proceso de pirolisis de residuos plásticos, basado en simulaciones bajo modelo Peng-Robinson apropiado para compuestos no polares como los hidrocarburos se demostró que el proceso es endotérmico (44)
- b) El craqueo.-** Es el proceso en el cual las moléculas de polímeros se descomponen en fragmentos más pequeños debido a la ruptura de enlaces químicos, la temperatura juega un papel fundamental en este proceso, ya que domina la reacción de craqueo (2)
- c) Tasa de calentamiento.-** La rapidez de calentamiento y la temperatura son dos factores que pueden ajustarse de manera independiente, sin embargo, cuando se aumenta la velocidad de calentamiento, generalmente resulta en temperaturas más elevadas, lo que a su vez puede dar lugar a un aumento en las reacciones secundaria que pueden generar una mayor cantidad de productos en estado gaseoso (27)

**Tabla 5**  
**Producción de productos gaseosos y líquidos**

Proceso	Velocidad de calentamiento	Tiempo de residencia	Temperatura (°C)	Producto objetivo
Carbonización lenta	Muy lento	Días	450 – 600	Carbón
Pirólisis lenta	10 – 100 K/min	10 – 60 min	450 – 600	Gas, petróleo, carbón
Pirólisis rápida	> 1 000 K/min	0,5 – 5 s	550 – 650	Gas, petróleo, (carbón)
Pirólisis flash	> 10 000 K/min	< 1s	450 – 900	Gas, petróleo, (carbón)

**Mejia y Upegui (2006)**

**d) Tiempo de pirólisis.-** Un mayor tiempo de residencia favorece una mayor conversión de los productos primarios de pirólisis, lo que significa que habrá una mayor transformación del plástico en productos más estables térmicamente, como hidrocarburos de peso molecular ligero y gases de petróleo no condensables (16) Cuando el tiempo de residencia es extenso en la pirólisis lenta, el material tiene más tiempo para descomponerse a temperaturas elevadas, lo que promueve la formación y acumulación de carbón y alquitrán en los productos resultantes, reduciendo la generación de combustible líquido (3)

**e) Presión.-** La presión generalmente es atmosférica, la baja presión (al vacío, o en presencia de un diluyente inerte) tiende a la producción de productos primarios, favoreciendo el rendimiento de alquitranes, en cambio presiones relativamente altas mejoraran nuestra producción de combustible líquido (34)

## **2.3. Marco conceptual**

### **2.3.1. Pirólisis lenta**

Se evaluó a un gradiente de  $\frac{30^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$  para un rango de 400°C – 600°C y un tiempo conveniente en minutos para obtener la menor generación de residuos carbonizados y gases no condensables. El tiempo necesario para llegar a la temperatura de pirólisis es mayor al tiempo de reacción de pirólisis por esto el tiempo será un factor determinante ya que tiende a la formación de residuos carbonizados y gases no condensables (14) La degradación de cadenas largas

en la pirolisis las cadenas más cortas tomaron menor tiempo evidenciándose en las formaciones de combustible líquido con bajas densidades al contrario de las que se obtuvieron después de unos minutos obteniendo así mayor densidad de mi fracción líquida obtenido en los minutos posteriores.

### **2.3.2. Temperatura de reacción**

Es una variable en la operación, interviene directamente en el proceso realizado, favoreciendo la degradación térmica de compuestos plásticos. El proceso de pirolisis empieza apropiadamente a los 300°C a si mismo dependiendo de las resinas termosensibles estos pueden ser menores mucho dependerá de la temperatura a la que se estudia la reacción los diferentes porcentajes de productos gaseosos, líquidos y sólidos (10)

### **2.3.3. Condensación**

Los diferentes productos de la pirolisis que se obtienen de acuerdo con la temperatura de condensación controlada serán en función al tiempo de paso en el intercambiador de calor, donde el gas de síntesis se transporta de una fase gaseosa a líquida. El producto de pirolisis se conforma por gas de síntesis donde se obtendrá una fase condensable con el fin de obtener un producto líquido por medio de un intercambiador de calor y refrigerante es necesario tener en cuenta que la fracción líquida obtenida contiene agua como subproducto que disminuye el poder calorífico por esta razón se hace uso de intercambiador de calor conectados en serie (1)

### **2.3.4. Rendimiento de reacción de pirólisis**

Considerado el porcentaje en peso combustible líquido obtenida por peso de muestra alimentada, evaluamos porcentaje de combustible líquido a toda la fracción líquida obtenido independientemente del tipo de combustible generado por los intercambiadores de calor. Los diferentes resultados obtenidos en investigaciones se diferencian por los distintos tipos de reactores y condiciones de operación en la pirolisis así mismo las conclusiones en donde todos coinciden son cualitativamente el PS produce elevado rendimiento de fracción líquida, el PVC genera altos rendimientos de gases tóxicos y residuos carbonosos, el PET produce considerables cantidades de gas y sólidos, las poliolefinas (PEAD,

PEBD y PP) logran generar mayor productos líquidos y ceras, pero menor cantidad de gases (50).

### **2.3.5. Tiempo de reacción**

Es un parámetro medido durante la operación de un proceso específico, es decir el tiempo de residencia conveniente dentro del reactor para la degradación térmica de las macromoléculas y generación de vapores condensables en combustible líquido, esto puede variar dependiendo de las condiciones como el tipo de reactor usado. Algunas investigaciones recomiendan estimar tiempos de pirólisis entre 60 y 120 minutos ya que se demostró producir la mayor cantidad de fracción líquida y a la vez eficiencia ahorrando costo de energía y tiempo en el proceso (13)

### **2.3.6. Producto obtenido de la pirólisis**

Es bien sabido que los productos de salida de la pirólisis del plástico son combustibles en estado sólido (pirocarbón), líquido, gaseoso. Al líquido obtenido de la pirólisis también se le conoce como combustible de hidrocarburo o aceite plástico, esta se puede caracterizar por su composición química y física (30)

La composición del material líquido producido en la pirólisis del plástico estará influenciada por la estructura y composición química de los polímeros que se estén degradando. Si la materia prima es un plástico de buena calidad y ante un proceso de pirólisis de alrededor de 500°C, se optimiza la fracción líquida pudiendo llegar a tener entre 80% a 85% de peso por volumen de entrada. Entonces a mayor presencia de cadenas de carbono saturadas, mayor será la eficiencia líquida del proceso. Otros factores que influyen son la fracción volátil y el contenido de cenizas (34)

## **2.4. Definición de términos básicos**

- a) **Polietileno tereftalato.**- Es un polímero plástico que se obtiene mediante un proceso de polimerización de ácido tereftálico y monoetilenglicol.
- b) **Polietileno de alta densidad.**- Es un polímero termoplástico formado por múltiples unidades de etileno.

**Tabla 6**  
**Características del combustible líquido**

Propiedades Físicas	Tipo de plástico (Valores experimentales típicos)						Estándares comerciales	
	PET	HDPE	LDPE	PVC	PP	PS	Gasolina	Diésel
Poder calorífico (MJ/Kg)	28,2	40,50	39,50	21,10	40,80	43,000	42,500	43,000
Grados API @ 60°F	N/R	27,48	47,75	38,98	33,03	N/R	55,000	38,000
Viscosidad (mm <sup>2</sup> /s)	N/R	5,08	5,,6	6,36	4,09	1,400	1,170	1,9 - 4,1
Densidad @ 15°C (g/cm <sup>3</sup> )	N/R	0,89	0,78	0,84	0,86	0,850	0,780	0,807
Cenizas (% peso)	N/R	0,00	0,02	N/R	0,00	0,006	–	0,010
Octanaje MON (min)	N/R	85,30	N/R	N/R	87,60	N/R	81 – 85	–
Octanaje RON (min)		95,30	N/R	N/R	97,80	90 – 98	91 – 95	–
Punto de fusión (°C)	N/R	– 5,00	N/R	N/R	– 9,00	– 67,000	–	6,000
Punto de inflamación (°C)	N/R	48,00	41,00	40,00	30,00	26,100	42,000	52,000
Punto de Anilina (°C)	N/R	45,00	N/R	N/R	40,00	N/R	71,000	77,500

N/R: No registra información, a: Viscosidad a 40°C, b: Viscosidad a 30°C, c: Viscosidad a 25°C, d: Viscosidad a 50°C

**Maqsood et al. (2021)**

- c) Cloruro de polivinilo.**- Es una combinación química de carbono, hidrógeno y cloro. Sus componentes provienen del petróleo bruto (43%) y de la sal (57%) Es el plástico con menos dependencia del petróleo.
- d) Polietileno de baja densidad.**- Es un polímero termoplástico de la familia de los olefínicos, formado por múltiples unidades de etileno.
- e) Polipropileno.**- Es el polímero termoplástico, parcialmente cristalino, que se *obtiene de la polimerización del propileno (o propeno)*
- f) Poliestireno.**- Es un polímero termoplástico que se obtiene de la polimerización del estireno. Se trata de un plástico duro y transparente. El poliestireno es uno de los termoplásticos más usados en la industria actual.
- g) O.**- Esta clasificación de los plásticos con la letra O, es la que engloba el conjunto de plásticos no reciclables, pero se pueden reutilizar sin problemas y son muy útiles para infinidad de manualidades y aprovechamientos.
- h) Polímeros sintéticos.**- Son aquellos que son obtenidos en laboratorio o en la industria. Algunos ejemplos de polímeros sintéticos son el nylon, el poliestireno, el policloruro de vinilo (PVC), el polietileno, etc.
- i) Monómero.**- Son moléculas orgánicas fundamentalmente formadas por átomos de carbono, hidrógeno y oxígeno entre los cuales se establecen uniones o enlaces covalentes.

- j) Proceso termoquímico.-** Los procesos termoquímicos son aquellos que transforman la materia orgánica, en determinadas condiciones de presión y temperatura, para obtener productos sólidos, líquidos o gaseosos, generalmente mediante reacciones exotérmicas.
- k) Enlaces covalentes.-** Se forman entre dos átomos del mismo elemento o entre átomos de diferentes elementos que comparten electrones de manera más o menos equitativa.
- l) Craqueo.-** Proceso químico por el cual se quiebran moléculas de un compuesto produciendo así compuestos más simples. El procedimiento original, todavía en uso, empleaba calor y presión y se denomina “craqueo térmico”
- m) Hidrocarburo.-** Son un grupo de compuestos orgánicos que contienen principalmente carbono e hidrógeno, conforman los compuestos orgánicos más simples y pueden ser considerados como las sustancias principales de las que se derivan todos los demás compuestos orgánicos.
- n) Catalizador.-** Es una sustancia que se puede añadir a una reacción para aumentar la velocidad de reacción sin ser consumida en el proceso

### **III. HIPÓTESIS Y VARIABLES**

#### **3.1. Hipótesis (general y específicas)**

##### **Hipótesis general**

Mediante el proceso pirolítico del PET en un equipo de pirólisis se obtendrá combustible líquido con alto rendimiento de conversión.

##### **Hipótesis específicas**

La temperatura del proceso de operación tiene influencia favorable en la degradación térmica en la pirólisis del tereftalato de polietileno.

El tiempo del proceso de operación influye en la eficiencia de la degradación térmica en la pirólisis del tereftalato de polietileno.

##### **3.1.1. Operacionalización de variable**

###### **Variable dependiente.**

**F(X)** : Rendimiento de conversión de combustible líquido mediante proceso de pirólisis

###### **Variables independientes**

**X 1** : Temperatura de proceso de pirólisis

**X 2** : Tiempo de proceso de pirólisis

**Tabla 7**  
**Operacionalización de variables**

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODOS
<b>I. Variable dependiente</b>					
$Y = F(X_1, X_2)$ Rendimiento de conversión de combustible líquido	El rendimiento de conversión es la diferencia del peso de los productos colectados en el sistema de colección, menos el sistema de colección vacío, todo entre el PET pirolizado (34)	Para hallar el rendimiento de conversión del combustible líquido se requiere obtener relación de pesos del combustible y muestra	$Y_{1.1} = \text{Grados de conversión}$	$Y_{1.2} = \%$	$\frac{\text{Peso de cimbustible}}{\text{Peso inicial muestra}} \times 100$
<b>II. Variable independiente</b>					
$X_1 = \text{Temperatura de proceso de pirólisis}$	Es la cual los componentes de los residuos plásticos se descomponen. A medida que se descomponen más componentes, el combustible obtenido es mayor (26)	Para la determinación de los parámetros del proceso de pirólisis se utilizan instrumentos de medición de tiempo y temperatura	$X_{1.1} = \text{Temperatura de reacción}$	$X_{1.1}: \text{° Celsius}$	Sensorial
$X_2 = \text{Tiempos de proceso de pirólisis}$	Es el que ayuda de manera directamente proporcional a la densidad y viscosidad del aceite de pirólisis (36)		$X_{1.2} = \text{Tiempos de proceso de pirólisis}$	$X_{1.2}: \text{Minutos}$	Cronometría

## IV. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

### 4.1. Diseño metodológico

#### 4.1.1. Tipo de investigación

Según el propósito, la presente investigación se caracteriza por ser aplicada ya que el fin es resolver un problema de naturaleza práctica, mediante la aplicación de un proceso pirolítico para la obtención combustible líquido a partir de PET, esto mediante el enfoque cuantitativo. Finalmente, por el diseño interpretativo la investigación se caracteriza por ser experimental ya que este tipo de investigación realiza mediciones y controles operacionales, que serán manipulados según variables independientes, además de medir las variables dependientes resultantes, buscando la relación de influencia de las variables independientes en nuestros resultados para interpretar un comportamiento óptimo y eficiente en el proceso.

#### 4.1.2. Diseño de investigación

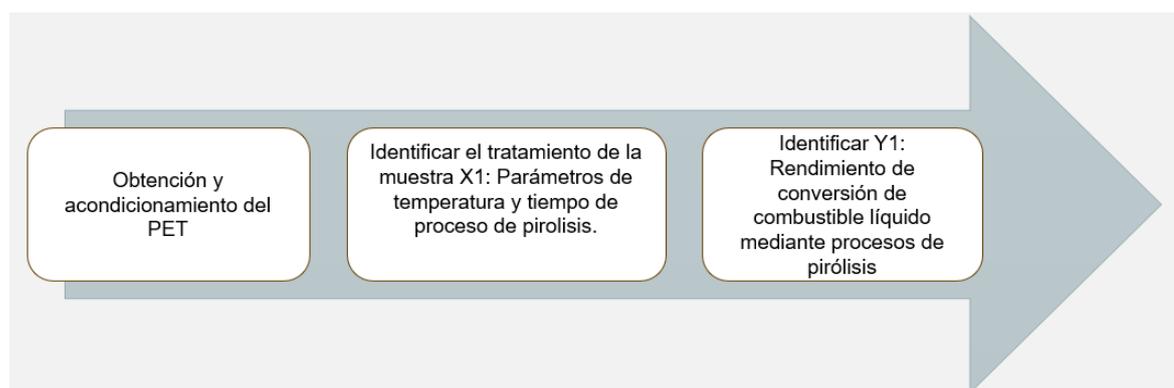
Se plantean dos etapas de investigación y una etapa previa para el acondicionamiento de la materia prima.

**Etapas Previas :** Obtención y acondicionamiento del PET

**Etapas 1 :** Identificar el tratamiento de la muestra X1: Parámetros de temperatura y tiempo de proceso de pirólisis.

**Etapas 2 :** Identificar Y: Rendimiento de conversión de combustible líquido mediante procesos de pirólisis

**Figura 2**  
**Etapas de investigación consideradas**



## 4.2. Método de investigación

- a) **Etapa Previa: Obtención y acondicionamiento de la muestra.**- En esta etapa se realizó un lavado de nuestro PET reciclado para eliminar cualquier tipo de residuos, seguido a esto procedemos a cortar o reducir el tamaño de plástico sin medida alguna, tan solo para mejorar una mejor área de contacto e interacción con la muestra durante el pesado y alimentación al reactor, se alimentó 500 g por lote.
- b) **Etapa 1: Primera etapa de la investigación – Pirolisis.**- En esta etapa se caracteriza los parámetros de temperatura y tiempo de pirolisis para la degradación térmica del PET en una atmosfera controlada de oxígeno, generando la mayor ruptura de cadenas para generar la sublimación a diferentes temperaturas: 500°C, 550°C y 600°C, así como de los siguientes tiempos de calentamiento: 30 min, 45 min y 60 min, tal como se muestra en la **Tabla 8**
- c) **Etapa 2: Segunda etapa de la investigación – Rendimiento de obtención de combustible.**- En esta etapa se determina el rendimiento de obtención de combustible por peso de alimentación, en base al análisis determinado por la teoría y lo experimental siendo evaluado la caracterización y calidad del combustible líquido obtenido a las temperaturas de destilado, por medio de un laboratorio externo, para así concluir con los parámetros óptimos de obtención de combustible.

**Tabla 8**  
**Niveles de factores**

<b>Factor</b>	<b>Nivel 1</b>	<b>Nivel 2</b>	<b>Nivel 3</b>
Temperatura de pirolisis	500	550	600
Tiempo de pirolisis	30	45	60

La investigación experimental se determinó en tres niveles y tres factores es de  $3 \times 3 = 9$  condiciones experimentales, cada una representando una prueba experimental de obtención de combustibles líquidos, realizándose por triplicado cada una.

**Tabla 9**  
**Diseño experimental**

N° experimento	Temperatura de pirólisis (°C)	Tiempo de pirólisis (min)
1	500	30
2	550	30
3	600	30
4	500	45
5	550	45
6	600	45
7	500	60
8	550	60
9	600	60

**Tabla 10**  
**Registro de la variable respuesta**

N° experimento	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Grado de conversión (%)
1	t1	T1	Y1,10
2	t2	T2	Y1,20
3	t3	T3	Y1,30
4	t4	T4	Y1,40
5	t5	T5	Y1,50
6	t6	T6	Y1,60
7	t7	T7	Y1,70
...	...	...	...
27	t27	T27	Y1,27

### 4.3. Población y muestra

#### 4.3.1. Población

Las muestras PET que pueden ser sometidas al proceso de pirólisis

#### **4.3.2. Muestra**

Se seleccionó 500 g de muestra específica de PET, esto debido a que esa cantidad es lo que entra en el reactor para llevar a cabo el proceso de pirólisis.

#### **4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado**

El proceso experimental se desarrolló en la calle Las Palmera Urb. Las Fresas de la provincia constitucional del Callao y posterior a ello se mandó a analizar a un laboratorio privado certificado. Esto se realizó entre los meses de julio a noviembre, aproximadamente 5 meses.

#### **4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos de la información**

##### **4.5.1. Técnicas para la recolección de información**

El número de datos está en función del diseño experimental, donde se utilizará los instrumentos de medición (termocupla, manómetro, pirómetro y panel de control) y materiales.

##### **4.5.2. Instrumentos para la recolección de datos**

Para el desarrollo del presente trabajo se requirió de equipos y materiales, los cuales son mencionados a continuación.

#### **Equipos**

- a) Reactor de pirólisis
- b) Intercambiador de calor
- c) Panel de control
- d) Resistor eléctrico
- e) Balanza

#### **Materiales**

- a) Recipientes de metal
- b) Abrazaderas
- c) Manguera
- d) Guantes térmicos
- e) Lentes protectores

- f) Respirador
- g) Alicates, destornillador

#### **4.6. Análisis y procesamiento de datos**

Los datos obtenidos en el experimento fueron llevados al análisis de varianza (ANOVA) así como con representación gráfica y establecer los factores óptimos para el proceso, por comparación de medias y la interacción entre las variables usando Microsoft Excel.

#### **4.7. Aspectos éticos en la investigación**

Los autores de la investigación se responsabilizan por la información emitida en el presente informe final de investigación, de acuerdo con el Reglamento del Código de Ética de investigación de la UNAC, Resolución del Consejo Universitario N° 260–2019–CU

## V. RESULTADOS

### 5.1. Resultados descriptivos

Para lograr obtener combustible líquido y así ver el grado de conversión, fue necesario el uso de un reactor de pirólisis, dando los resultados que se muestran en las **Tablas 11, 12 (Ver pag. N° 36) y 13 (Ver pag. N° 37)**

**Tabla 11**  
*Primera corrida experimental*

N° experimento	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Grado de conversión (%)
1	30	500	0,00
2	45	500	1,00
3	60	500	4,00
4	30	550	0,00
5	45	550	2,00
6	60	550	13,0
7	30	600	0,00
8	45	600	5,00
9	60	600	14,0

**Tabla 12**  
*Segunda corrida experimental*

N° experimento	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Grado de conversión (%)
1	30	500	0,0
2	45	500	0,0
3	60	500	7,0
4	30	550	0,0
5	45	550	0,0
6	60	550	16,0
7	30	600	1,0
8	45	600	6,0
9	60	600	12,0

**Tabla 13**  
**Tercera corrida experimental**

N° experimento	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Grado de conversión (%)
1	30	500	0.0
2	45	500	3.0
3	60	500	5.0
4	30	550	0.0
5	45	550	2.0
6	60	550	14.0
7	30	600	0.0
8	45	600	5.0
9	60	600	17.0

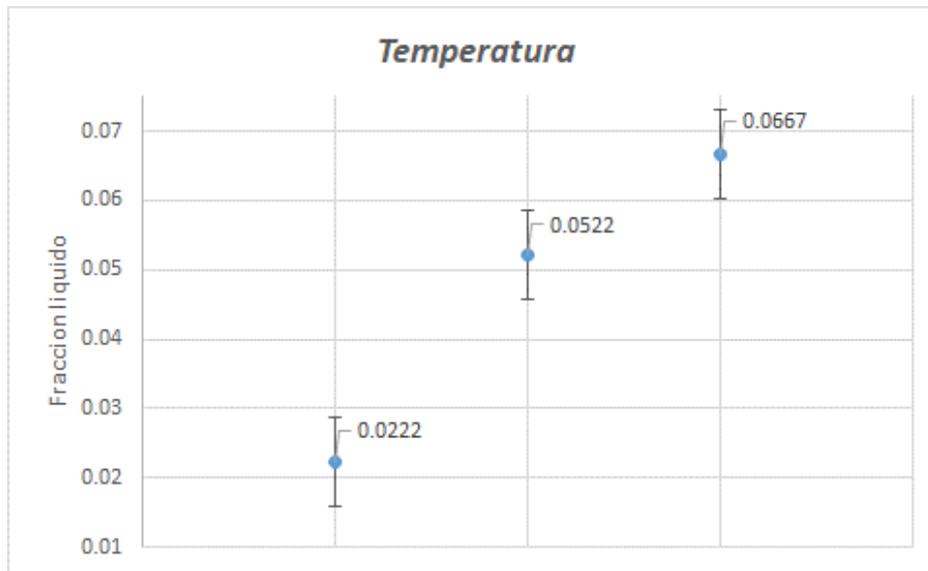
## 5.2. Resultados inferenciales

Luego de obtener los resultados, se empezó a realizar el análisis estadístico ANOVA, haciendo mención que se hizo las corridas experimentales por triplicado, los valores obtenidos se muestran en la **Tabla 14**

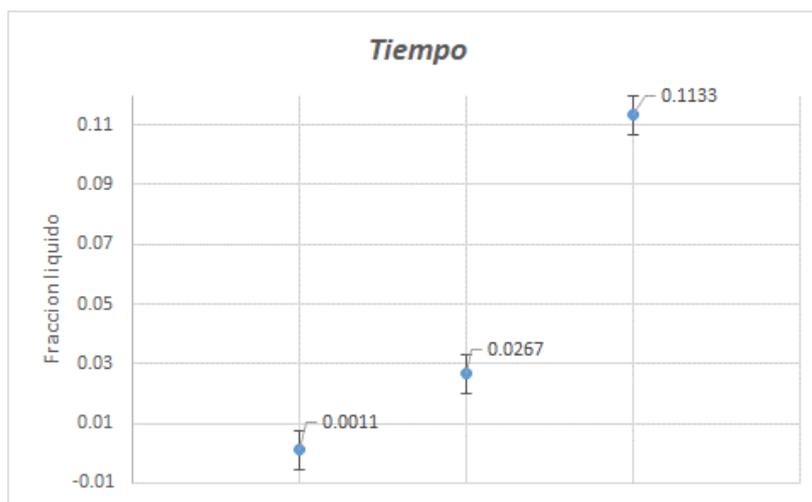
**Tabla 14**  
**Análisis de varianza**

Origen variación	Grados libertad	SC Ajuste	MC Ajuste	Valor F	Valor crítico F	Valor P
Temperatura	2	0,0092	0,0046	27,152	3,555	$3,67 \times 10^{-6}$
Tiempo	2	0,0622	0,0311	182,760	3,555	$1,10 \times 10^{-12}$
Interacción	4	0,0102	0,0025	14,923	2,928	$1,05 \times 10^{-5}$
Total	26	0,0031	0,0002			

**Figura 3**  
**Media fracción líquida en base a la temperatura**

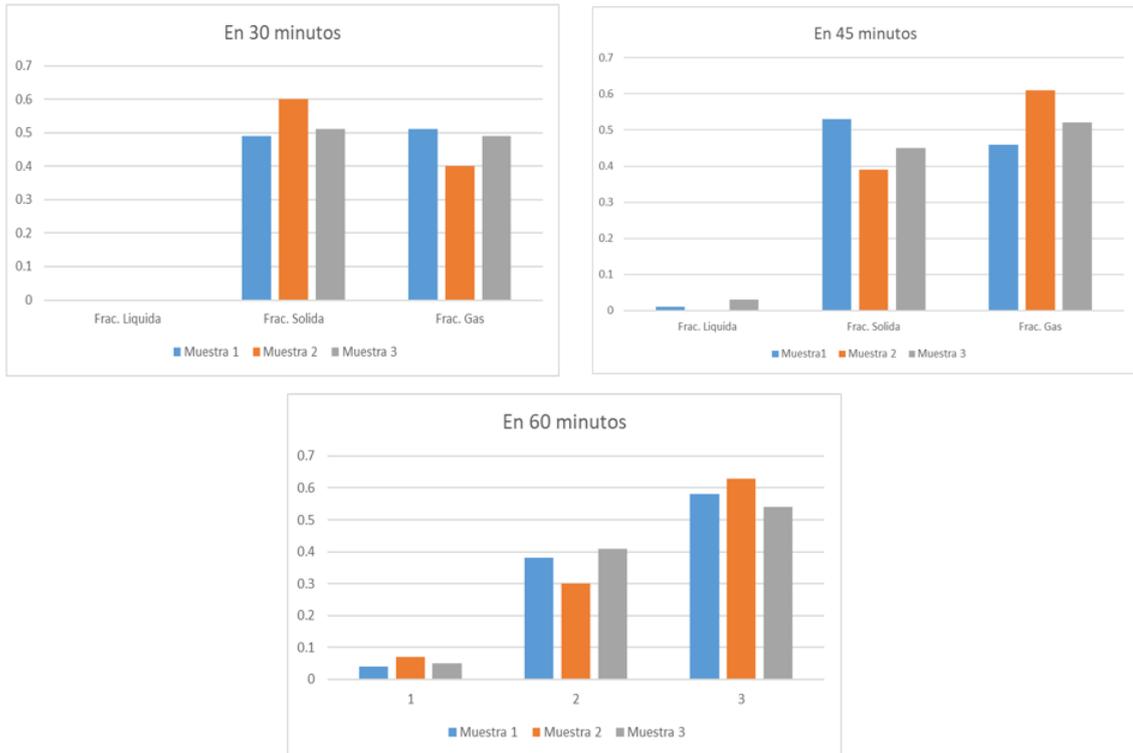


**Figura 4**  
**Media fracción líquida en base al tiempo**

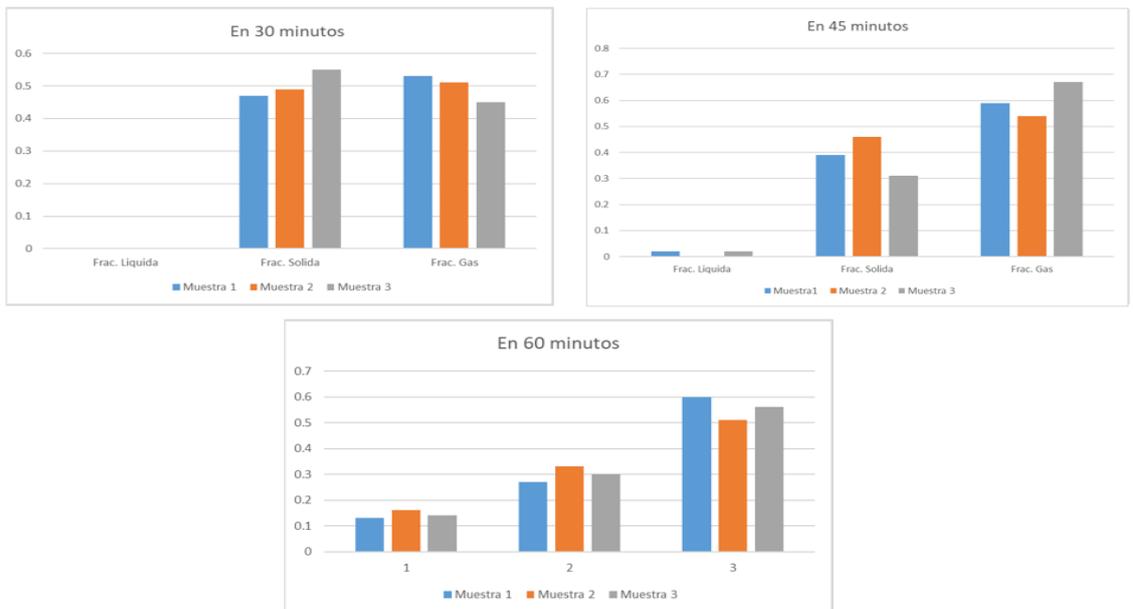


Así mismo, en las **Figuras 5, 6 (Ver pag. Nº 39)** y **7 (Ver pag. Nº 40)** se muestran gráficos de barra, indicando las fracciones de grados de conversión, mostrando las variaciones en base al tiempo para una misma temperatura.

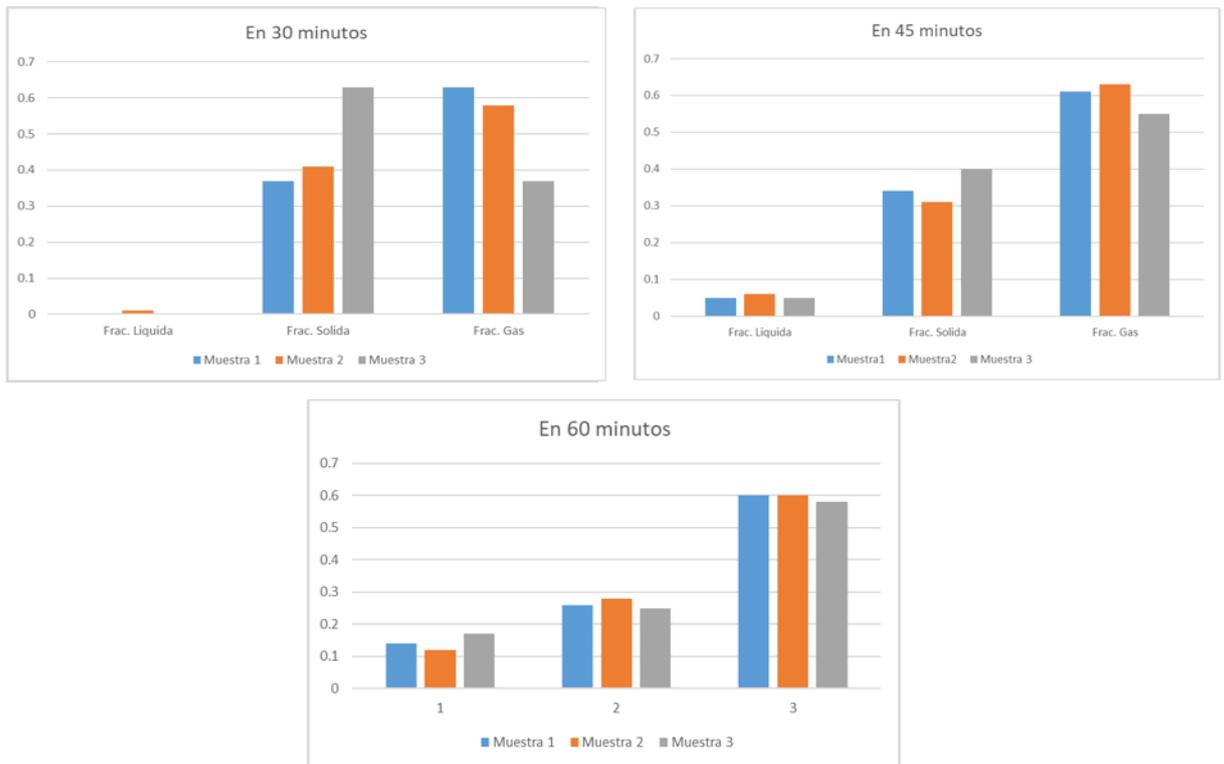
**Figura 5**  
**Fracciones producto a 500°C en base al tiempo**



**Figura 6**  
**Fracciones producto a 550°C en base al tiempo**



**Figura 7**  
**Fracciones producto a 600°C en base al tiempo**



## **VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

### **6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados**

Se logró obtener un combustible líquido luego de realizar el proceso de pirólisis con un grado de conversión promedio del 14%

Según el análisis de varianza ANOVA bifactorial, se determinó que para la variable temperatura como se muestra en la **Figura 3 (Ver pag. Nº 38)**, las medias de fracción líquida incrementan conforme aumenta la temperatura, resultando que a 600°C se logró obtener 0,0667 y así mismo un p-valor menor a 0.05, cercano a cero, por lo que con una significancia mayor del 95% se rechaza la hipótesis nula y se acepta al alterna.

Con respecto al análisis de tiempo en el ANOVA, se determinó una media de 0,1133 para un tiempo de 60 min, esto se muestra en la **Figura 4 (Ver pag. Nº 38)**, evidenciando el incremento de la media de fracción líquida con respecto al tiempo y así mismo un p – valor menor a 0,05, cercano a cero, por lo que con una significancia mayor del 95% se rechaza la hipótesis nula y se acepta al alterna.

### **6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares**

La influencia de la temperatura en tres niveles, siendo 500°C, 550°C y 600°C, determinando un mayor porcentaje de combustible líquido con esta última en el proceso de pirólisis, corroborando lo que indica Pinagorte & Sanchez (34) que trabajó en dos niveles de 350°C y 500°C, donde obtuvo mayor fracción líquida a 500°C y que asciende a 4,5%

Según lo expuesto por Cajas y Campaña (7), evalúa el efecto de tiempo en cuatro niveles (40 min, 50 min, 60 min y 70 min) en la pirólisis de una mezcla de PET y polipropileno con respecto al porcentaje de conversión, obteniendo un alto rendimiento de combustible líquido de un 94,33% para un tiempo de 60 min; se corrobora que para nuestro presente trabajo se obtuvo el mayor porcentaje de conversión para un tiempo de 60 min, que fueron trabajados en tres niveles (30 min, 45 min y 60 min)

Según nuestro análisis estadístico ANOVA se evaluó dos variables independientes de temperatura y tiempo, determinando un p-valor de menor a 0.05 verificando la significancia de la interacción de ambas variables en el proceso de pirólisis, obteniendo un 14% de conversión de combustible líquido a 600°C y 60 minutos, siendo este es más alto obtenido, esto se corrobora con el artículo científico de Martynis, Miranda y Harahap (26) que evalúa a diferentes temperaturas (250°C, 300°C, 350°C y 400°C) y tiempos (30 min y 60 min), donde resulta evidente la interacción de estas variables, obteniendo un alto porcentaje de conversión de un 88,86 de fracción líquida, a una temperatura 400°C y tiempo de 60 min.

### **6.3. Responsabilidad ética de acuerdo con los reglamentos vigentes**

Debido al diseño que presenta el trabajo de investigación, experimental, se siguieron las buenas prácticas de laboratorio al realizar las corridas experimentales para la obtención de una data correcta. Así mismo, se contrató un laboratorio externo certificado para el análisis químico del producto obtenido. Los autores se hacen responsables de los datos emitidos en este trabajo.

## **VII. CONCLUSIONES**

- 1) Se obtuvo combustible líquido mediante el proceso de pirolisis del tereftalato de polietileno, llegando a una máxima conversión de fracción líquida del 14% en promedio.
- 2) Se determinó que el parámetro temperatura presenta mayor efecto para la pirolisis del tereftalato de polietileno para una alta conversión de 14% en promedio de combustible líquido a 550°C
- 3) Se determinó el tiempo óptimo de 60 minutos de reacción de pirolisis del tereftalato de polietileno para la alta conversión de combustible líquido del 14% promedio.

## **VIII. RECOMENDACIONES**

- 1) Evaluar la obtención de combustible líquido a presiones mayores a 8 bar en el proceso de pirolisis del PET bajo las mismas condiciones realizadas para mayor análisis como variable independiente.
- 2) Evaluar el proceso de pirolisis de PET con un reactor de mayor gradiente de temperatura para comparar el efecto de la degradación térmica en el proceso y en la obtención de combustible líquido.
- 3) Evaluar el uso de gases inertes para el control o barrido de oxígeno en el proceso de pirolisis del PET para comparar la significancia en la obtención de combustible líquido.
- 4) Realizar una evacuación total de gas de síntesis al terminar la reacción de pirolisis y tomar medidas de seguridad ante posible deflagración al abrir el reactor al término del proceso.

## IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1). ACOSTA, Daniela y CASTRO, Lizbeth, 2021. Diseño del proceso de pirólisis para la producción de biocombustibles a partir de residuos sólidos urbanos. . Bogotá: Fundación Universidad de América.
- (2). AGUILAR, Carlos, 2019. Producción de Hidrocarburos a partir de la Pirolisis de Nuez de Mango con Catalizadores y Mezcla con Plástico. Bogotá.
- (3). AL-RUMAIHI, Aisha et al., 2022. A review of pyrolysis technologies and feedstock: A blending approach for plastic and biomass towards optimum biochar yield. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 167, pp. 5-6. DOI <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112715>.
- (4). ALVARADO, Ricardo, 2020. Ingeniero de procesos: Plásticos de Honduras S.A. de C.V. Alvarado.
- (5). BELTRÁN, Maribel y MARCILLA, Antonio, 2012. Tecnología de polímeros. Procesado y propiedades [en línea]. Universidad de Alicante. Recuperado a partir de: [https://books.google.com.pe/books?hl=en&lr=&id=jxilUUn4\\_QAC&oi=fnd&pg=PA15&dq=related:u\\_XzbATDaacJ:scholar.google.com/&ots=eCSr8sorvH&sig=4sxzM4Y7vWa7YdiDUki27ymLbzY&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pe/books?hl=en&lr=&id=jxilUUn4_QAC&oi=fnd&pg=PA15&dq=related:u_XzbATDaacJ:scholar.google.com/&ots=eCSr8sorvH&sig=4sxzM4Y7vWa7YdiDUki27ymLbzY&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false) [accedido 2 junio 2023].
- (6). BILLMEYER, Fred, 2020. Ciencia de los polímeros [en línea]. Reverté. ISBN 8429191623. Recuperado a partir de: [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=Fe0FEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=ciencia+de+los+polimeros+libro&ots=e3AZqVgdjP&sig=5UVYT\\_\\_tdJJzR1KSrxqedNuabTg#v=onepage&q=ciencia%20de%20los%20polimeros%20libro&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=Fe0FEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=ciencia+de+los+polimeros+libro&ots=e3AZqVgdjP&sig=5UVYT__tdJJzR1KSrxqedNuabTg#v=onepage&q=ciencia%20de%20los%20polimeros%20libro&f=false) [accedido 29 marzo 2023].
- (7). CAJAS, Alex y CAMPAÑA, Brandao, 2019. Obtención y caracterización de un combustible obtenido a partir de los desechos del PET y polipropileno. Guayaquil.
- (8). CANTOR, Jessika y PEÑA, Mayerly, 2021. Revisión de los procesos para la producción de combustibles provenientes de residuos plásticos.

- (9). CASTILLO, Nicole y PACHECO, Johana, 2018. La disposición de reciclar botellas de plástico PET en la generación de los Millennials. ¿Es cierto todo lo que se dice? Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
- (10). CRESPO, Sara, 2013. Evaluación de la pirolisis térmica de residuos de polietileno proveniente de la producción de banano en un reactor batch.
- (11). CUI, Yunlei et al., 2023. Microwave-assisted fluidized bed reactor pyrolysis of polypropylene plastic for pyrolysis gas production towards a sustainable development. *Applied Energy*. Vol. 342, p. 121099. DOI <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121099>.
- (12). DELGADO, Sindy, 2021. Evaluación del proceso de pirólisis de tereftalato de polietileno (PET) en atmosfera inerte de dióxido de carbono.
- (13). DIAZ, Kellys, 2022. Análisis del proceso de pirolisis para la obtención de combustible a partir de residuos plásticos. Bogota: Universidad Antonio Nariño.
- (14). FIGUEROA, Juan y CHELA, Stalin, 2021. Diseño de un prototipo de reactor de pirólisis térmica para la descomposición y aprovechamiento de residuos plásticos fabricados a partir del pp, pe, y ps. riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- (15). FLORES, Paulo, 2020. The issue of plastic use during the Covid-19 pandemic. *South Sustainability*. pp. 1-2. DOI 10.21142/ss-0102-2020-016.
- (16). GAO, Feng, 2010. Pyrolysis of waste plastics into fuels.
- (17). GUTIÉRREZ, Tania, 2019. Polímeros: Generalidades y tendencias de investigación en Colombia [en línea]. Editorial Universidad del Cauca. ISBN 9587323505. Recuperado a partir de: <https://www.google.com.pe/books/edition/Pol%C3%ADmeros/XoewDwAAQBAJ?hl=es&gbpv=1> [accedido 24 mayo 2023].
- (18). IEES, 2019. Fabricación de productos de plástico [en línea]. Recuperado a partir de: [https://www.sni.org.pe/wp-content/uploads/2019/07/Reporte-Sectorial-PI%C3%A1sticos\\_2019.pdf](https://www.sni.org.pe/wp-content/uploads/2019/07/Reporte-Sectorial-PI%C3%A1sticos_2019.pdf) [accedido 22 septiembre 2023].
- (19). INDECOPI, 2022. Informe de Lanzamiento del Estudio de Mercado sobre Combustibles Líquidos y Gas Licuado de Petróleo en el Perú.

- (20). JUNG, Celine y FONTANA, André, 2006. Production of Gaseous and Liquid Fuels by Pyrolysis and Gasification of Plastics: Technological Approach. En: ISBN 9780470021545. DOI 10.1002/0470021543.ch10.
- (21). KALARGARIS, Ioannis, TIAN, Guohong y GU, Sai, 2017. Combustion, performance and emission analysis of a DI diesel engine using plastic pyrolysis oil. Fuel Processing Technology. Vol. 157, pp. 108-115. DOI 10.1016/j.fuproc.2016.11.016.
- (22). KLEMEŠ, Jiří Jaromír et al., 2020. Minimising the present and future plastic waste, energy and environmental footprints related to COVID-19. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 127. DOI 10.1016/j.rser.2020.109883.
- (23). LAREDO, Georgina C, REZA, Joel y MENESES, Edith, 2023. Hydrothermal liquefaction processes for plastics recycling: A review. Cleaner Chemical Engineering. Vol. 5, p. 100094. DOI <https://doi.org/10.1016/j.clce.2023.100094>.
- (24). LUCANA, Dante, 2008. DISEÑO DE UN MOLDE PARA LA FABRICACIÓN DE PROBETAS DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ PLÁSTICA Y REFUERZOS DE FIBRAS NATURALES MEDIANTE COMPRESIÓN TÉRMICA.
- (25). MAQSOOD, Tariq et al., 2021. Pyrolysis of plastic species: A review of resources and products. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. Vol. 159. DOI 10.1016/j.jaap.2021.105295.
- (26). MARTYNIS, M, WINANDA, E y HARAHAP, A, 2019. Thermal pyrolysis of polypropylene plastic waste into liquid fuel: reactor performance evaluation. En: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, p. 012047. IOP Publishing. 2019. ISBN 1757-899X.
- (27). MEJIA, Santiago y UPEGUI, Sergio, 2021. La pirólisis y otros métodos para el aprovechamiento de residuos de neumáticos como fuente de energía para la industria.
- (28). MILIAN, Lorelis et al., 2020. Obtención de bioproductos por pirólisis lenta de cascarillas de café y cacao para su posible uso como fuentes de energía y fertilizantes. Revista Colombiana de Química. Vol. 49, número 2, p. 24.
- (29). MINAM, 2021. Conclusiones y recomendaciones del MINAM sobre Proyecto de ley que propone la postergación del plazo para la entrada en vigencia de la prohibición establecida en el literal c), del numeral 3.3 del artículo 3 de la Ley nº

- 30884, ley que regula el plástico de un solo uso y los recipientes o envases descartables [en línea]. Lima. Recuperado a partir de: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2617362/MINAM%20sobre%20PL%20399-2021-CR%20Tecnopor%2015.12.2021%20%282%29.pdf.pdf> [accedido 3 abril 2023].
- (30). MOORTHY, Krishna et al., 2020. Review of catalyst materials in achieving the liquid hydrocarbon fuels from municipal mixed plastic waste (MMPW). *Materials Today Communications*. Vol. 24, p. 100982. DOI <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.100982>.
- (31). MUÑOZ, Anderson, CHALACO, Marcos y ARECHE, Javier, 2021. Descripción del comportamiento de una varilla de plástico reciclado de polietileno tereftalato (PET) extruido.
- (32). NGUYEN, Ha Thi Hoang et al., 2018. The quest for high glass transition temperature bioplastics. *Journal of Materials Chemistry A*. Vol. 6, número 20, pp. 9298-9331.
- (33). NUNEZ, Christina, 2019. What are fossil fuels? *National Geographic* [en línea]. Recuperado a partir de: <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/fossil-fuels> [accedido 5 mayo 2023].
- (34). PINARGOTE, Leonardo y SANCHEZ, Adilson, 2023a. Obtención de combustible a partir de residuos plásticos mediante el proceso de pirólisis.
- (35). POBLETE, Esteban, 2013. Pirólisis catalítica de desechos plásticos mediante zeolitas modificadas con cobre. Santiago de Chile.
- (36). PRURAPARK, Ruktai et al., 2020. Effect of temperature on pyrolysis oil using high-Density polyethylene and polyethylene terephthalate sources from mobile pyrolysis plant. *frontiers in energy research*. Vol. 8. DOI [10.3389/fenrg.2020.541535](https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.541535).
- (37). QIN, Xiaojing et al., 2023. Preparation of pyrolysis products by catalytic pyrolysis of poplar: Application of biochar in antibiotic wastewater treatment. *Chemosphere*. Vol. 338, p. 139519. DOI <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139519>.

- (38). RAMOS VÁSQUEZ, Williams Javier, 2017. Obtención de combustibles líquidos a partir de residuos de polipropileno [en línea]. Recuperado a partir de: <https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/10056> [accedido 22 abril 2023].
- (39). RAMOS, Williams y PRETELL, Victor, 2021. Obtención de combustible líquido a partir de residuo de polietileno de alta densidad. En: Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology. Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions. 2021. ISBN 9789585207189. DOI 10.18687/LACCEI2021.1.1.94.
- (40). RODRÍGUEZ, Alberto, 2022a. Concentración y poder de mercado en el sector del petróleo a escala global. El caso de las empresas chinas.
- (41). ROJAS, Eugenia, 1997. El ABC de los plásticos [en línea]. 1ra. Universidad Iberoamericana. Recuperado a partir de: [https://www.google.com.pe/books/edition/EI\\_ABC\\_de\\_los\\_pl%C3%A1sticos/QW8UyW9YO9QC?hl=es&gbpv=1&dq=clasificacion+de+plasticos&pg=PA5&printsec=frontcover](https://www.google.com.pe/books/edition/EI_ABC_de_los_pl%C3%A1sticos/QW8UyW9YO9QC?hl=es&gbpv=1&dq=clasificacion+de+plasticos&pg=PA5&printsec=frontcover) [accedido 9 enero 2023].
- (42). SHARUDDIN, S. et al., 2018. Pyrolysis of plastic waste for liquid fuel production as prospective energy resource. En: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Institute of Physics Publishing. 6 abril 2018. DOI 10.1088/1757-899X/334/1/012001.
- (43). SONI, Vineet et al., 2021. Thermochemical Recycling of Waste Plastics by Pyrolysis: A Review. American Chemical Society. Energy and Fuels 35. DOI 10.1021/acs.energyfuels.1c01292.
- (44). TIMANA, Juan et al., 2022. Techno-Economic Analysis of a Pyrolysis Plant Obtained by Simulation to Produce Synthetic Oil from Plastic Waste. En: Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology. Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions. 2022. ISBN 9786289520705. DOI 10.18687/LACCEI2022.1.1.326.
- (45). URIARTE CÁCERES, Diego Nicolás, 2018. Experimentación de la obtención de combustibles líquidos a partir del polietileno de alta densidad. [en línea]. Recuperado a partir de:

<https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/17060>

[accedido 22 abril 2023].

- (46). USAID, 2020. LOS DESECHOS PLÁSTICOS EN EL MAR Y LA GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS EN PERÚ.
- (47). VILLEGAS, Erick y ZAMUDIO, Valery, 2022. Influencia de la temperatura y el tamaño de partícula durante el proceso de pirolisis en el rendimiento del combustible líquido obtenido a partir de residuos del poliestireno expandido (EPS).
- (48). YADAV, Geetanjali et al., 2023. Techno-economic analysis and life cycle assessment for catalytic fast pyrolysis of mixed plastic waste. *Energy & Environmental Science*. DOI 10.1039/d3ee00749a.
- (49). YOUNG, Holly y WALKER, Tamsin, 2021. Plástico ¿un salvavidas para la industria de los combustibles fósiles? 2 julio 2021.
- (50). ZAVALA, Jesús, 2017. Modelado y simulación de un proceso de despolimerización vía pirolisis catalítica: polietileno de alta densidad (PEAD).
- (51). ZHANG, Yuanjia et al., 2023. Conversion of Polyethylene to High-Yield Fuel Oil at Low Temperatures and Atmospheric Initial Pressure. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. Vol. 20, número 5. DOI 10.3390/ijerph20054048.

## **ANEXOS**

## ANEXO 01

### MATRIZ DE CONSISTENCIA

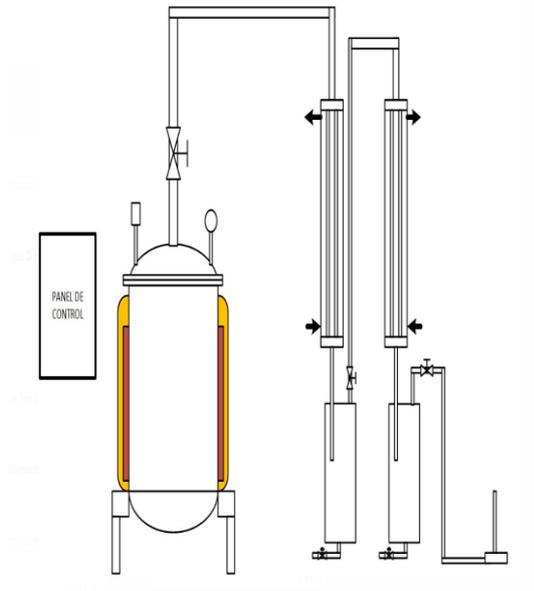
#### “OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO A PARTIR DE TEREFTALATO DE POLIETILENO MEDIANTE PROCESOS DE PIRÓLISIS”

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSION	INDICADORES	METODOLOGÍA
¿Cómo se obtendrá combustible líquido con alto rendimiento de conversión a partir de tereftalato de polietileno mediante procesos de pirólisis?	Obtener combustible líquido con alto rendimiento de conversión a partir del tereftalato de polietileno mediante el proceso de pirólisis	Mediante el proceso pirolítico del PET en un equipo de pirólisis se obtendrá combustible líquido con alto rendimiento de conversión.	$y = F(X_1, X_2)$ Rendimiento de conversión de combustible líquido	y <sub>1.1</sub> = Grados de conversión	y <sub>1.2</sub> = %	$\frac{\text{Peso combustible}}{\text{Peso inicial muestra}} \times 100$
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPOTESIS ESPECÍFICAS	VARIABLE INDEPENDIENTE	DIMENSION	INDICADORES	METODOLOGÍA
1. a) ¿Cuál será la temperatura del proceso de pirólisis del tereftalato de polietileno para la obtención de combustible líquido?	1. a) Determinar la temperatura del proceso de pirólisis del tereftalato de polietileno para la obtención de combustible líquido.	1. La temperatura del proceso de operación tiene influencia favorable en la degradación térmica en la pirólisis del tereftalato de polietileno.	x <sub>1</sub> = Temperatura de proceso de pirólisis	x <sub>1.1</sub> = Temperatura de reacción	x <sub>1.1</sub> = ° Celsius	Sensorial
2. b) ¿Cuál será el tiempo de reacción para la obtención de combustible líquido obtenido a partir del tereftalato de polietileno mediante el proceso de pirólisis?	2. b) Determinar el tiempo de reacción para la obtención de combustible líquido obtenido a partir del tereftalato de polietileno mediante el proceso de pirólisis	2. El tiempo del proceso de operación influye en la eficiencia de la degradación térmica en la pirólisis del tereftalato de polietileno.	x <sub>2</sub> = Tiempos del proceso de pirólisis	x <sub>1.2</sub> = Tiempo de reacción	x <sub>1.2</sub> = Minutos	Cronometría

## ANEXO 02

### DISEÑO EXPERIMENTAL

#### Diseño experimental del reactor para el proceso de pirólisis



## ANEXO 03

### EVIDENCIAS FOTOGRÁFICAS DEL PROCESO

#### A: Muestra previo tratamiento de pirólisis



#### B: Equipo de reactor de pirólisis



**C: Instalación del reactor de pirólisis alimentado con PET**



**D: Algunas temperaturas utilizadas para el proceso**



**E: Presión subiendo en el proceso de pirólisis**



**F: Fracción sólida**



**G: Fracción líquida**



**H: Fracción gaseosa**



## I: Formación de cera



## J: Prueba inflamabilidad, fracción líquida



**K: Prueba inflamabilidad, cera obtenida**



**L: Retenes grafitados**



## ANEXO 04

### INFORME DE ANÁLISIS DE LABORATORIO EXTERNO

**intertek**

Total Quality. Assured.

Tel +511 6449714  
www.intertek.com.pe

**INFORME DE ENSAYO N°: 02128H/23**  
**No. Referencia Intertek: 2023-LIMA-000668**

<b>Cliente:</b> Jean Pierre Espinoza Chiriboga	<b>Referencia del Cliente:</b> Correo Electrónico
<b>Contacto:</b> Jean Espinoza	
<b>Dirección:</b> Calle las palmeras, Mz D Lt. 6 Urb. Las Fresas, Callao	

<b>Descripción de la Muestra:</b> <sup>(a)</sup> DIESEL*	<b>Fecha de recepción:</b> 21-Noviembre-2023
<b>Identificación:</b> Combustible Parafínico de Pirolisis de Plástico; Muestra-01; Tesista Jean Pierre Espinoza Chiriboga; F.M.: 20/11/2023	<b>Fecha inicio de análisis:</b> 21-Noviembre-2023
<b>Cantidad:</b> 1.00 L	<b>Fecha fin de análisis:</b> 24-Noviembre-2023
<b>Presentación:</b> Envase de plástico	<b>ID Muestra:</b> 2023-LIMA-000668-001
<b>Procedencia:</b> Suministrado por el Cliente.	<b>ITS REF.:</b> PER/12819-23
<b>Lugar de ensayo:</b> Laboratorio Caleb Brett	

Método/Versión	Ensayo	Resultado	Unidad
ASTM D4868-17	<b>Estimación del Calor de Combustión Neto y Bruto en Quemadores de Hidrocarburos y Combustibles Diesel</b>		
	Estimación del Calor de Combustión Bruto	46.01	MJ/kg
	Estimación del Calor de Combustión Neto	43.05	MJ/kg
ASTM D95 - 13 (Reapproved 2018)	<b>Agua en los Productos de Petróleo y Materiales Bituminosos por Destilación</b>		
	Contenido de Agua	0.80	% Vol
ASTM D482-19	<b>Cenizas de Productos Petróleos</b>		
	Contenido de Cenizas	0.007	%masa
ASTM D445-21e2	<b>Viscosidad Cinemática de Líquidos Transparentes y Opacos (y Cálculo de la Viscosidad Dinámica)</b>		
	Viscosidad Cinemática a 40 °C	3.353**	cSt
ASTM D93-20	<b>Punto de Inflamación por Equipo Pensky-Marten</b>		
	Punto de Inflamación Corregido	<40.0	°C
ASTM D1298- 12b(R2017)e1	<b>Procedimiento</b>		
	A		
	<b>Densidad, Densidad Relativa o Gravedad API de Petróleo Crudo y Productos Líquidos de Petróleo por el Método del Hidrómetro</b>		
ASTM D4294-21	<b>Gravedad API 60 °F</b>		
	Gravedad API 60 °F	45.6	°API
ASTM D4294-21	<b>Densidad a 15 °C</b>		
	Densidad a 15 °C	0.7987	g/mL
ASTM D4294-21	<b>Azufre en Petróleo y sus derivados por Espectrometría de Energía Dispersiva de Rayos X de Fluorescencia</b>		
	Contenido de Azufre	<17	mg/kg

<sup>(a)</sup> Según lo indicado por el cliente.

\* La muestra no es fluida a temperatura ambiente.

\*\* Para el ensayo de viscosidad ASTM D445 la muestra se separa en dos fases solo pudiéndose analizar la fase inferior.

**Notas:**

1. Este Informe no debe ser reproducido parcial o totalmente sin la aprobación por escrito de INTERTEK TESTING SERVICES PERU S.A.
2. Los resultados de los ensayos emitidos en el presente informe sólo son válidos para la muestra indicada no debiendo ser usados como una certificación de conformidad o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo brinda.
3. Los resultados de los ensayos emitidos han sido realizados por el Laboratorio Caleb Brett.
4. La información contenida en este informe está basada en pruebas de laboratorio y observaciones realizadas por Intertek Testing Services Perú S.A. La muestra fue enviada por el cliente sólo para análisis. En estos casos, donde nosotros no podemos acreditar la procedencia de la muestra, Intertek Testing Services Perú S.A. renuncia a cualquier responsabilidad por daño o lesión que puede resultar por el uso de la información contenida en este informe, y nada de lo contenido debe ser constituido como una garantía o representación por Intertek Testing Services Perú S.A. con respecto a la exactitud de la información, la muestra, producto o ítem descrito, o su adecuación de uso para cualquier propósito específico.

Autorizado por:

intertek

Ana Fuente P.

Firmado Digitalmente Por:  
ANA ELIZABETH  
PUENTE  
PORTOCARRERO  
N° Colegiatura: C.I.P  
Cargo: Jefe de  
Laboratorio Caleb Brett  
DNI: 41175750  
Fecha: 27/11/2023  
13:54:47

**Intertek Testing Services Perú S.A.**

Calle Mariscal José de La Mar N° 200 - Urb. Industrial Residencial el Pino - San Luis - LIMA - PERU  
Email: [intertekperu@intertek.com](mailto:intertekperu@intertek.com)  
Oficinas en: Paita - Sechura - Colico - Malabrigo - Chimbote - Mollendo - Lima



## ANEXO 05

### TABLAS COMPARATIVAS

#### A: Comparación de propiedades entre diésel, biodiésel y green diésel

	Diésel	Biodiésel	Green Diésel
Densidad a 15°C (Kg/m <sup>3</sup> )	840,00	880,00	780,00
Contenido en oxígeno (% m/m)	0	11,00	0
Contenido en parafinas (% m/m)	67.80	0	100,00
Contenido en azufre (mg/Kg)	<10	<1	<1
Poder Calorífico (MJ/Kg)	43,00	38,00	44,00
Emisiones de NO <sub>x</sub> , frente al Diesel	-	+10%	-10 %
Emisiones de CO <sub>2</sub> (Kg/MJ)	0.08	0,06	0,04

#### B: Propiedades de combustible convencionales

Datos fisicoquímicos	Biodiésel	Diésel
Composición	Ester metílico de ácidos grasos	Hidrocarburos
Formula química	C12 – C22	C10 – C21
Poder calorífico MJ/Kg (aprox.)	39,7	45,200
Viscosidad cinemática, cst (a 40°C)	3,5 – 5,0	3,0 – 4,5
Peso específico, g/m <sup>3</sup>	0,875 – 0,900	0,850
Azufre, %P	0	0,200
Punto de ebullición, °C	190 – 340	180 – 335
Punto de inflamación, °C	120 – 170	60 – 80
Punto de escurrimiento, °C	-15/+16	-35/-15
Numero de cetanos	48 – 60	46,000
Relación estequiométrica aire/comb. p/p	13,8	15,000