

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL
Y RECURSOS NATURALES**



TESIS

**Obtención de combustible líquido con polietileno de alta densidad y tereftalato
mediante procesos de Pirólisis en el Distrito de Umachiri – Puno, 2024**

Asesor:

Ing. Guzmán Gamarra, Jesús Aurelio

Autores:

Chili Nina, Winy Jesbet

Noa Flores, Elizabeth

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Ambiental

Cusco – Cusco –Perú

2024



ACTA DE SUSTENTACIÓN ORAL DE LA TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES

Modalidad de titulación: Presentación, Sustentación y Aprobación de Tesis Profesional.

En la ciudad del Cusco siendo las 09:00 horas del día 23 de diciembre del año dos mil veinticuatro, en concordancia con el Reglamento General de Grado Académico y Título de la Universidad Tecnológica de los Andes, y en mérito a la Resolución Sub Directoral N° RSD-153-2024-UTEA-FIEPIARN-SD del 11 de diciembre del 2024, se realiza el acto académico de sustentación de la tesis, intitulada "OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO CON POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD Y TEREFALATO MEDIANTE PROCESOS DE PIRÓLISIS EN EL DISTRITO DE UMACHIRI – PUNO, 2024", presentado por las bachilleres señoritas CHILI NINA WINY JESBET Y NOA FLORES ELIZABETH; como asesor del trabajo de investigación Ing. JESÚS AURELIO GUZMÁN GAMARRA. Habiéndose nombrado al jurado con resolución Sub directoral RSD- 153 - 2024-UTEA-FI - EPIARN-SD, que está conformada por los señores docentes:

- Presidente: Mg. Cynthia Cecilia Arrieta Concha
- Replicante: Mg. Paul Gerardo Vargas Meza
- Dictaminante: Mg. Helidia Hanco Loayza

El acto académico se realizó de la siguiente manera:

Primero: El docente secretario designado dio lectura de la resolución sub Directoral N° RSD- 153 - 2024-UTEA-FIEPIARN-SD, en el que se señala la fecha y hora y el jurado correspondiente para la sustentación de la tesis antes mencionada, así como los artículos 18 y 19 del Reglamento General de Grado Académico y título de la Universidad Tecnológica de los Andes.

Segundo: Se procedió con la sustentación de las tesis señoritas bachilleres aspirantes al título de Ingeniero Ambiental y Recursos Naturales.

Tercero: Se procedió con las preguntas y repreguntas por parte del jurado calificador quienes en una ficha de observaciones hacen conocer por escrito sus apreciaciones y observaciones al trabajo de investigación(tesis).

Cuarto: El presidente del jurado invitó a las señoritas bachilleres y al público en general para que se sirvan desocupar el salón de grados para que el jurado dilucide las calificaciones y determine la nota calificadora de las aspirantes al título profesional.

Quinto: Culminada con la calificación de parte de los señores integrantes del jurado se dio a conocer públicamente la nota obtenida por las señoritas bachilleres, la misma que fue 18 (dieciocho) puntos.

El presidente del jurado calificador hará llegar a las bachilleres las fichas de observaciones para que puedan levantar las observaciones en los plazos previstos.

Siendo las 10:12 am horas se dio por concluido el acto de sustentación, firmando los señores integrantes del jurado, las señoritas bachilleres en señal de conformidad.

Mg. Cynthia Cecilia Arrieta Concha
Presidente

Mg. Paul Gerardo Vargas Meza
Replicante

Mag. Helidia Hanco Loayza
Dictaminante

Bach. Chili Nina Winy Jesbet

Bach. Noa Flores Elizabeth

Obtención de combustible líquido con polietileno de alta densidad y tereftalato mediante procesos de Pirólisis en el Distrito de Umachiri – Puno, 2024.docx

INFORME DE ORIGINALIDAD

15%

INDICE DE SIMILITUD

15%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

6%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.espam.edu.ec Fuente de Internet	3%
2	repositorio.uncp.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	dspace.ups.edu.ec Fuente de Internet	1%
4	repositorio.espe.edu.ec Fuente de Internet	1%
5	Submitted to Universidad Tecnológica de los Andes Trabajo del estudiante	1%
6	tesis.unap.edu.pe Fuente de Internet	1%
7	alicia.concytec.gob.pe Fuente de Internet	1%
8	core.ac.uk Fuente de Internet	1%

Metadatos

Datos de los Autores		
Apellidos y nombres	:	Chili Nina Winy Jesbet
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Numero de Documento de Identidad	:	70288588
URL ORCID	:	https://orcid.org/0009-0007-5118-6721
Apellidos y nombres	:	Noa Flores Elizabeth
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Numero de Documento de Identidad	:	76632856
URL ORCID	:	https://orcid.org/0009-0005-2604-1489
Datos del Asesor		
Apellidos y nombres	:	Ing. Gamarra Guzman, Jesus Aurelio
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Numero de Documento de Identidad	:	23831600
URL ORCID	:	https://orcid.org/0000-0001-9687-4930
Datos de la investigación		
Facultad	:	Ingeniería
Escuela Profesional	:	Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales
Línea de Investigación	:	Calidad Ambiental
Rango de años en el que se realizó la investigación	:	setiembre del 2023 – diciembre del 2024
Fuente de financiamiento	:	Autofinanciado
Porcentaje de similitud	:	15%
URL de OCDE	:	https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.01

Dedicatoria

En primer lugar, agradezco a Dios y a mi familia por orientarme, darme aliento y permitirme cumplir mis objetivos para alcanzar mis sueños en la vida. Expreso mi profundo agradecimiento a mi padre, José Chili, por ser mi referente de esfuerzo y resiliencia. A mi madre, Olga S. Nina y a mi hermano Kevin, por ser mi ejemplo de constancia y voluntad, confiar en mis capacidades y motivarme cada día a ser una mejor persona.

Winy

A Dios, fuente de sabiduría infinita y guía en cada paso de mi vida, gracias por ser mi luz en los momentos de incertidumbre y mi fuerza en los momentos de debilidad.

A mis padres, Sandra Flores y Feliciano Noa, y a mi hermano Ronald por su comprensión y por ser mi fuente constante de inspiración, mis pilares y por su amor inquebrantable.

Elizabeth

Agradecimiento

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas que han contribuido de manera significativa a la realización de este trabajo de tesis en especial a nuestro asesor Ing. Jesús Aurelio Guzmán Gamarra por su orientación sabia, paciencia infinita y motivación constante durante esta travesía académica, y a todos aquellos que de alguna manera contribuyeron a este trabajo, por su colaboración, aportes valiosos y por haber enriquecido este proyecto con su conocimiento y experiencia.

Resumen

El estudio evaluó el rendimiento del Polietileno de Alta Densidad (PEAD) y el Tereftalato de Polietileno (PET) en la producción de combustible líquido mediante pirolisis en Umachiri, Puno, en 2024. Se buscó mitigar problemas ambientales optimizando la reutilización, reducción y reciclaje de residuos plásticos. El objetivo fue comparar los rendimientos de estos plásticos bajo la hipótesis de que el PEAD sería superior.

La investigación utilizó un enfoque cuantitativo, aplicado y explicativo con diseño experimental. Se recolectaron 5 kg de bolsas y botellas plásticas mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia. Las técnicas incluyen observación, pruebas de laboratorio y mediciones con instrumentos como viscosímetros, densímetros y espectrofotómetros.

Los resultados, analizados mediante ANOVA, confirmaron que el rendimiento del PEAD es significativamente superior al del PET. El PEAD mostró un rendimiento medio de 13.301% frente al 8.1166% del PET ($F = 322.74$; $p = 0.000$). En términos de volumen, el PEAD produjo 1.16163 litros/kg, mientras que el PET generó 0.45156 litros/kg ($F = 16007.27$; $p = 0.000$). Además, el combustible derivado del PEAD presentó mayor densidad y viscosidad, con valores p de 0.000 en ambos casos.

Se concluye que el PEAD no solo ofrece un mayor rendimiento en la obtención de combustible líquido mediante pirolisis, sino también mejor calidad en términos de propiedades físicas, destacándose como una opción más eficiente y sostenible en comparación con el PET.

Palabras claves: Pirolisis, Polietileno de Alta Densidad, Tereftalato de Polietileno, Combustible líquido y Rendimiento.

Abstract

The study evaluated the performance of High Density Polyethylene (HDPE) and Polyethylene Terephthalate (PET) in the production of liquid fuel by pyrolysis in Umachiri, Puno, in 2024. The objective was to mitigate environmental problems by optimizing the reuse, reduction and recycling of plastic waste. The objective was to compare the performance of these plastics under the hypothesis that HDPE would be superior.

The research used a quantitative, applied and explanatory approach with an experimental design. Five kilograms of plastic bags and bottles were collected using non-probability convenience sampling. Techniques included observation, laboratory tests and measurements with instruments such as viscometers, hydrometers and spectrophotometers.

The results, analyzed by ANOVA, confirmed that the performance of the HDPE is significantly superior to that of the PET. HDPE showed a mean yield of 13.301% versus 8.1166% for PET ($F = 322.74$; $p = 0.000$). In terms of volume, HDPE produced 1.16163 liters/kg, while PET generated 0.45156 liters/kg ($F = 16007.27$; $p = 0.000$). In addition, the HDPE-derived fuel presented higher density and viscosity, with p-values of 0.000 in both cases.

It is concluded that HDPE not only offers higher performance in obtaining liquid fuel by pyrolysis, but also better quality in terms of physical properties, standing out as a more efficient and sustainable option compared to PET.

Keywords: Pyrolysis, High Density Polyethylene, Polyethylene Terephthalate, Liquid Fuel and Performance.

Índice

Portada.....	i
Acta de sustentación.....	ii
Reporte de similitud.....	ii
Metadatos.....	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimiento.....	vi
Resumen.....	vii
Abstract.....	viii
Índice de tablas.....	xi
Índice de figuras.....	xiii
Índice de anexos.....	xiv
Acrónimos.....	xv
I. Introducción.....	16
II. Planteamiento del Problema.....	18
2.1. Descripción de la Realidad Problemática.....	18
2.2. Identificación y formulación de problemas.....	20
2.3. Objetivos.....	20
2.3.1. Objetivo General.....	20
2.3.2. Objetivos Específicos.....	21
2.4. Justificación.....	21
2.5. Hipótesis.....	22
2.5.1. Hipótesis General.....	22
2.5.2. Hipótesis específicas.....	22
2.6. Variables.....	23

III. Marco Teórico	25
3.1. Antecedentes de investigación	25
3.2. Bases teóricas	33
6.3. Definición de Términos	56
6.4. Marco Normativo	57
IV. Metodología.....	59
4.1. Tipo y nivel de investigación	59
4.2. Ámbito temporal y espacial	60
4.3. Población, muestra y muestreo	61
4.3.1. Población.....	61
4.3.2. Muestra.....	63
4.3.3. Muestreo.....	64
4.4. Técnicas	64
4.5. Instrumentos.....	64
4.6. Procedimientos.....	67
4.7. Análisis de Datos	74
4.8. Consideraciones éticas	75
V. Resultados y discusión.....	77
VI. Conclusiones	105
VII. Recomendaciones.....	107
VIII. Bibliografía	109
IX. Anexos	0

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Matriz de Operacionalización de Variables</i>	24
Tabla 2 <i>Tipos de plásticos más comunes</i>	35
Tabla 3 <i>Tabla de muestra (PET Y PEAD)</i>	63
Tabla 4 <i>Ficha de Observación</i>	65
Tabla 5 <i>Ficha de recolección de datos</i>	66
Tabla 6 <i>Rendimiento de Combustible Líquido por Tipo de Plástico</i>	77
Tabla 7 <i>Características de Combustibles Comerciales (Información Teórica)</i>	80
Tabla 8 <i>Tabla de Características Fisicoquímicas del Combustible Obtenido</i>	81
Tabla 9 <i>Comparativa de densidades del PEAD y PET</i>	83
Tabla 10 <i>Comparativa de Viscosidad del PEAD y PET</i>	84
Tabla 11 <i>Comparativa de Gravedad API del PEAD y PET</i>	85
Tabla 12 <i>Comparativa del Punto de Inflamación del PEAD y PET</i>	86
Tabla 13 <i>Comparativa del Calor Específico del PEAD y PET</i>	87
Tabla 14 <i>Estadísticas descriptivas de variables del proceso de pirólisis para PEAD y PET</i>	88
Tabla 15 <i>Estadísticas descriptivas de la densidad y viscosidad del PEAD y PET</i>	89
Tabla 16 <i>Prueba de normalidad</i>	90
Tabla 17 <i>Prueba de Levene</i>	90
Tabla 18 <i>Anova del Rendimiento de Combustible Líquido entre PEAD y PET</i>	91
Tabla 19 <i>Prueba de tukey para rendimiento</i>	92
Tabla 20 <i>Análisis de varianza para el Volumen de Combustible Líquido por Kilogramo entre PEAD y PET</i>	93
Tabla 21 <i>Prueba de tukey para volumen por Kg</i>	94
Tabla 22 <i>Anova para la Densidad del Combustible Líquido Derivado de PEAD y PET</i> ..	95

Tabla 23 <i>Prueba de tukey para densidad (g/ml)</i>	96
Tabla 24 <i>Anova para la Viscosidad del Combustible Líquido Derivado de PEAD y PET</i>	97
Tabla 25 <i>Prueba de tukey para viscosidad (Kg/m·s)</i>	98
Tabla 26 <i>ANOVA del Rendimiento y Calidad del Combustible Líquido entre PEAD y PET</i> <i>(Rendimiento, Densidad, Viscosidad)</i>	100

Índice de figuras

Figura 1 <i>Proceso de pirólisis en un reactor</i>	44
Figura 2 <i>Ubicación geográfica del distrito de Umachiri</i>	61
Figura 3 <i>Análisis de la composición física de residuos sólidos - Umachiri</i>	62
Figura 4 <i>Proceso de Pirolisis</i>	69
Figura 5 <i>Rendimiento de Combustible Líquido por Tipo de Plástico</i>	77
Figura 6 <i>Proceso pirolítico del PET</i>	78
Figura 7 <i>Proceso pirolítico del PEAD</i>	79
Figura 8 <i>Comparativa de Densidad</i>	83
Figura 9 <i>Comparativa de Viscosidad</i>	84
Figura 10 <i>Comparativa de Gravedad API</i>	85
Figura 11 <i>Comparativa del Punto de Inflamación</i>	86
Figura 12 <i>Comparativa del Calor Específico</i>	87
Figura 13 <i>Grafica de caja para rendimiento</i>	92
Figura 14 <i>Grafica de caja volumen por Kg</i>	94
Figura 15 <i>Grafica para para densidad (g/ml)</i>	96
Figura 16 <i>Grafica de caja para viscosidad (Kg/m·s)</i>	98

Índice de anexos

Anexo A *Matriz de Consistencia y Operacionalización de variables*

Anexo B *Documentos*

Anexo C *Panel Fotográfico*

Anexo D *Base de Datos Estadísticos*

Acrónimos

MINAM	: Ministerio del Ambiente
API	: American Petroleum Institute Gravity
PEBD	: polietileno de baja densidad
PP	: polipropilenos
PS	: poliestireno
PVC	: Policloruro de Vinilo
EPS	: poliestireno expandido
PEAD	: Polietileno de Alta Densidad
FCC	: Fluid Catalytic Cracking
PET	: Tereftalato de Polietileno
UNESCO	: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura)

I. Introducción

En el contexto actual de creciente preocupación por el impacto ambiental y la búsqueda de alternativas sostenibles para el manejo de residuos plásticos, la pirolisis se presenta como una técnica prometedora para la transformación de polímeros como el Polietileno de Alta Densidad (PEAD) y el Tereftalato de Polietileno (PET) en combustibles líquidos. Este estudio se centra en evaluar el rendimiento de PEAD y PET en la producción de combustible líquido mediante procesos de pirolisis, específicamente en el distrito de Umachiri, Puno, durante el año 2024. La investigación parte de la premisa de que el PEAD podría ofrecer un rendimiento superior al del PET en términos de cantidad y calidad del combustible obtenido.

El problema de investigación surge ante la necesidad de encontrar métodos eficaces para gestionar los desechos plásticos, considerando que estos materiales representan una amenaza significativa para el medio ambiente y la salud pública debido a su lenta degradación. Esta problemática se intensifica en contextos como el distrito de Umachiri, donde la gestión adecuada de residuos plásticos es crucial, pero enfrenta limitaciones significativas.

Con el objetivo de determinar el rendimiento de la obtención de combustible líquido a partir de PEAD y PET mediante pirolisis, se plantea una investigación cuantitativa de tipo aplicada y explicativa, utilizando un diseño experimental. Además, se formulan hipótesis

tanto generales como específicas y se detalla la operacionalización de variables. La población objeto de estudio comprende todas las bolsas y botellas plásticas del distrito de Umachiri, con una muestra representativa de 5 kg seleccionada mediante muestreo no probabilístico por conveniencia. La recolección de datos se realiza mediante observación directa e indirecta, pruebas de laboratorio y mediciones de campo, empleando instrumentos como viscosímetros, densímetros, cronómetros y balanzas digitales.

El marco teórico aborda antecedentes internacionales, nacionales y regionales sobre la transformación con el método de la pirolisis de plásticos, así como fundamentos teóricos relacionados con los tipos de plástico, propiedades químicas y físicas, y los impactos ambientales de los residuos plásticos. Además, se analiza el marco normativo pertinente y se conceptualiza el proceso de pirolisis en relación con la obtención de combustible líquido.

En términos metodológicos, se describe el tipo de investigación, el alcance y diseño de la misma. Se discuten consideraciones éticas y se establece el procedimiento estadístico para el análisis de datos, incluyendo pruebas de hipótesis para validar los resultados obtenidos.

En resumen, este estudio contribuye al conocimiento científico al proporcionar información relevante sobre la eficacia de la pirolisis como método de valorización de residuos plásticos en una comunidad específica como Umachiri, destacando las diferencias en rendimiento y calidad del combustible líquido derivado de PEAD y PET. Los hallazgos y conclusiones resultantes permiten orientar a políticas públicas y prácticas industriales hacia opciones más sostenibles en la gestión de residuos plásticos.

II. Planteamiento del Problema

2.1. Descripción de la Realidad Problemática

De acuerdo al tema propuesto, “Obtención de Combustible Líquido con Polietileno de Alta Densidad y Tereftalato Mediante procesos de Pirolisis en el Distrito de Umachiri – Puno, 2024”, se plantea una problemática relacionada con la gestión de residuos plásticos y la obtención de combustible líquido a través de la pirólisis en una ubicación específica, en este caso en la región de Distrito de Umachiri - Puno. De allí, tomado en cuenta lo que señala Díaz (2022) sobre algunas consideraciones clave que podrían estar involucradas en esta problemática se puede determinar, en primer lugar, la acumulación de residuos plásticos ayuda a mantener efectos contaminantes, pues la producción y el consumo de productos de polietileno de alta densidad y tereftalato (PET) generan una gran cantidad de residuos plásticos. La acumulación de estos desechos puede ser un problema ambiental y estético en el distrito de Umachiri.

según plantea Filgueira, (2021) menciona que, cada año a nivel mundial se produce aproximadamente 303 millones de toneladas de plástico, de las cuales el 75 % se descarta sin recibir ningún tipo de tratamiento. De este modo según la UNESCO (2023) las proyecciones indican que para el año 2050, la producción de plásticos se habrá triplicado, mientras que la cantidad de plástico en los océanos se habrá triplicado para el 2040,

alcanzando un total de 32 millones de toneladas por año, pues según Plastics Europe (2021) la producción global de plásticos llegó a 368 millones de toneladas, lo que representa un aumento del 2.5 % en comparación con 2018 y un aumento del 5.9 % con respecto a 2017. De ese total, el 4 % corresponde a plásticos producidos en América Latina.

En el Perú, de acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística en (2022) se generaron 532000 toneladas de residuos plásticos, de las cuales el 50 % correspondió a plásticos de un solo uso. Además, en 2019, la generación per cápita de residuos sólidos en el país fue de 0.73 kg por habitante al día, y el 11 % de los residuos generados por habitante estuvo compuesto por materiales plásticos según señala el Ministerio del Ambiente del Perú, lo que implica un crecimiento residual de desechos plásticos que no solo perjudican al individuo sino al medio ambiente.

Los plásticos, pueden tardar entre 100 y 1000 años en degradarse en condiciones atmosféricas, se convierten en residuos difíciles de gestionar y a menudo se acumulan en vertederos. En algunos casos, las personas recurren a métodos de eliminación directa, como la quema de plásticos al aire libre, y como resultado se emiten partículas y gases que contribuyen al efecto invernadero y causan daños ambientales y riesgos para la salud.

Por otro lado, los combustibles fósiles como el petróleo, son recursos no renovables de gran importancia. Según una revisión estadística de la energía mundial realizada por British Petroleum (2019) las reservas mundiales de petróleo alcanzaban los 1 733.99 mil millones de barriles, con una extracción de 35.9 mil millones de barriles ese mismo año. Si se proyecta un modelo lineal con tasas de consumo constantes, se estima que las reservas de petróleo se agotarán para el año 2067.

Esta situación plantea un escenario preocupante, tanto la extracción de derivados del petróleo y la generación de residuos plásticos, junto a su disposición inadecuada, tienen un impacto negativo en los ecosistemas, causando la contaminación del agua, del suelo y de la

atmósfera, tal como lo señala la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2023)

2.2. Identificación y formulación de problemas

2.2.1. Problema General

¿Cuál es el rendimiento del Polietileno de Alta Densidad (PEAD) y Tereftalato (PET) en la obtención de combustible líquido mediante procesos de pirolisis en el distrito de Umachiri – Puno en el 2024?

2.2.2. Problemas Específicos

- ¿Cuántos litros de combustible líquido se obtienen por kilogramo de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) y Tereftalato (PET) sometidos a pirolisis?
- ¿Cómo varía la calidad del combustible líquido derivado de PEAD y PET en términos de parámetros de densidad y viscosidad?
- ¿Existen diferencias en el rendimiento y la calidad del combustible líquido obtenido individualmente del Polietileno de Alta Densidad (PEAD) y el Tereftalato de Polietileno (PET)?

2.3. Objetivos

2.3.1. Objetivo General

Evaluar el rendimiento de la obtención de combustible líquido a partir del Polietileno de Alta Densidad (PEAD) y Tereftalato (PET) mediante procesos de pirolisis en el distrito de Umachiri, Puno, durante el año 2024.

2.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar la cantidad de litros de combustible líquido obtenidos por kilogramo de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) y Tereftalato (PET) sometidos a pirolisis.
- Analizar la calidad del combustible líquido derivado del PEAD y PET en términos de parámetros de densidad y viscosidad.
- Determinar si existen diferencias en el rendimiento y la calidad del combustible líquido obtenido individualmente del PEAD y PET.

2.4. Justificación

A lo largo de las últimas seis décadas, el petróleo ha adquirido un mercado de interés, tanto en el ámbito económico e industrial, desempeñando un papel fundamental en la realización de tareas específicas y en la satisfacción de diversas necesidades. Se ha convertido en uno de los recursos energéticos más demandados a nivel mundial, aportando aproximadamente el 80 % de la energía utilizada en electricidad, calefacción y transporte, lo que subraya la importancia y versatilidad de sus derivados en diversos campos.

Un porcentaje que oscila entre el 5 % y el 7 % de la extracción global de petróleo anual se destina a la producción de plásticos y se prevé que esta cifra podría alcanzar hasta el 20 % para el año 2050. Esto ha motivado a investigadores comprometidos en generar conocimientos y prácticas orientadas hacia la gestión más eficiente de los residuos plásticos.

La creciente acumulación de residuos plásticos, junto con la creciente demanda de fuentes de energía más limpias, plantea desafíos significativos en el ámbito ambiental, según argumentan Mariño y Suarez (2018). En respuesta a esta problemática, se busca la conversión de aquellos plásticos que son reciclables en materia prima para la generación de energía, y una de las técnicas destacadas en este proceso es la pirólisis, la cual prolonga el ciclo de vida de los residuos plásticos.

Como consecuencia de esta preocupación, se han desarrollado diversas tecnologías destinadas a la conversión de plásticos en combustibles, siendo una de las más utilizadas, debido a su bajo costo, la técnica de la pirólisis; el cual es un proceso termoquímico donde los plásticos se someten a altas temperaturas sin la presencia de oxígeno, con el propósito de descomponerlos en fracciones más pequeñas. Este proceso permite el craqueo de las cadenas largas de los polímeros, ya que están compuestos por hidrocarburos mezclados con diversos aditivos. En el caso del producto líquido resultante, sus propiedades son comparables a las de los combustibles líquidos compuestos por hidrocarburos en el rango medio de destilación.

En resumen, abordar el tema de la obtención de combustible líquido a partir de polietileno de alta densidad y tereftalato mediante procesos de pirólisis en el Distrito de Umachiri - Puno en 2024 es justificable debido a sus beneficios potenciales en términos de gestión de residuos, acceso a energía, desarrollo económico y sostenibilidad ambiental. Además, puede servir como un ejemplo de cómo la tecnología y la innovación pueden abordar los desafíos locales y mejorar la calidad de vida de la comunidad.

2.5. Hipótesis

2.5.1. Hipótesis General

El rendimiento de la obtención de combustible líquido mediante la pirolisis del Polietileno de Alta Densidad (PEAD) es superior al rendimiento obtenido con el Tereftalato (PET) en el distrito de Umachiri, Puno, durante el año 2024.

2.5.2. Hipótesis específicas

Por cada kilogramo de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) y Tereftalato (PET) sometidos a pirolisis en el distrito de Umachiri, se obtienen litros de combustible líquido.

El combustible líquido derivado de PEAD presenta diferencias significativas en densidad y viscosidad en comparación con el combustible derivado de PET.

Existe una diferencia significativa en el rendimiento y la calidad del combustible líquido obtenido del Polietileno de Alta Densidad (PEAD) y del Tereftalato de Polietileno (PET).

2.6. Variables

- **Variable Independiente:** Polietileno de alta densidad (PEAD) y Tereftalato (PET)
- **Variable Dependiente:** Combustible líquido

Tabla 1*Matriz de Operacionalización de Variables*

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ÍTEMS
Variable Independiente Polietileno de alta densidad (PEAD)	Para fines de análisis en un proceso de pirólisis, Beghetto et al. (2021) indica que el tereftalato de polietileno (PET), por su parte, es un polímero termoplástico perteneciente al grupo de los poliésteres, caracterizado por su alta resistencia, transparencia y estabilidad química.	Se pesó en gramos la cantidad de PEAD y PET.	Cantidad procesada	• Masa de PEAD	• Kg o gr.
			Condiciones del proceso	• Temperatura de Pirólisis • Tiempo de Procesamiento • Velocidad de Calentamiento	• Grados °C • Minutos (min) o Horas (h) • °C/min o °C/h
Variable Independiente Tereftalato (PET)					
Variable Dependiente: Combustible Líquido	Díaz (2022) señala que el combustible líquido de pirólisis se define como el producto líquido obtenido después de someter plásticos como PEAD y PET a un proceso de pirólisis bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo de residencia, y catalizadores.	Se midió en términos de gramos líquido en condiciones de temperaturas controladas y tiempo de residencias El producto se evaluó en términos de su densidad, calor específico, viscosidad, punto de inflamación, poder calorífico, grafos API, para determinar su viabilidad como combustible.	Rendimiento del combustible	• % de conversión	• ml/g
			Calidad del combustible	• Densidad del combustible • Calor específico • Viscosidad • Grados API • Punto de inflamación	• g/cm ³ • cal/g.°C • g/cm.s • Grados API • °C

III. Marco Teórico

3.1. Antecedentes de investigación

3.1.1 A nivel internacional

Díaz (2022). En su investigación “Análisis del proceso de pirolisis para la obtención de combustible a partir de residuos plásticos”, en la Universidad Antonio Nariño, Bogotá D.C, Colombia. El propósito del estudio fue Efectuar una revisión sobre el proceso de la pirolisis térmica de residuos plásticos para la obtención de combustible. Señala que la falta de conciencia ambiental y educación ha llevado a una gestión inadecuada de este recurso, con consecuencias negativas para el medio ambiente, incluido el agotamiento de recursos no renovables como el petróleo y la contaminación de ecosistemas, especialmente en entornos acuáticos. El plástico, debido a su lenta velocidad de degradación que puede tomar de 100 a 1000 años, se ha ido acumulando en áreas urbanas, generando problemas ambientales, sociales y de salud pública. Ante esta problemática, existen diversos enfoques para abordar los desechos plásticos, y en dicho estudio, se enfocó en el proceso de mitigación de esta contaminación. El proceso de mitigación implicó la transformación del plástico en una mezcla de hidrocarburos conocida como "aceite ligero que previamente se usaba como fuente de energía. Este proceso se conoce como pirólisis y se refiere a la descomposición térmica de moléculas grandes en ausencia de oxígeno. Se llevo a cabo a temperaturas que oscilan entre 400 °C y 1000 °C, y da como resultado fracciones útiles en forma de gas,

líquido y sólido. Los productos generados a través del pirólisis, como el etileno, el metano y el propileno, pueden ser reciclados o utilizados como combustibles en la industria petroquímica. En este sentido, el proceso de pirólisis catalítico presenta ventajas, como un menor consumo de energía y la producción de materiales plásticos con una distribución estrecha del número de carbonos, que pueden transformarse en compuestos aromáticos.

Un segundo estudio elaborado por Gil et al. (2019) titulado “Simulación y obtención de combustibles sintéticos a partir de la pirólisis de residuos plásticos”. Señala que la constante necesidad de plásticos ha originado extensas acumulaciones de desechos en vertederos, lo que ha repercutido negativamente en el medio ambiente y en la salud de la población. En Colombia, cada año se producen aproximadamente 9,5 millones de toneladas de desechos sólidos, de los cuales un 14% son de material plástico. Una de las soluciones para mitigar este problema es la pirólisis, un proceso que permite transformar los residuos plásticos en energía y productos en forma de combustible líquido y gaseoso. En este estudio se evalúan y comparan dos modelos en Aspen Plus para simular el proceso de pirólisis con el objetivo de obtener combustibles líquidos a partir de diversos tipos de residuos plásticos. Los modelos están fundamentados en la minimización de la energía libre de Gibbs y en mecanismos cinéticos de reacción. A través de las simulaciones, se obtuvieron los rendimientos (% en peso) y las propiedades de cada corriente de producto en función de las condiciones operativas. Los resultados mostraron que el modelo termodinámico presentó desviaciones mayores al 20%, mientras que el modelo cinético tuvo errores menores o iguales al 8%. Según los resultados, la eficacia de la producción de combustibles líquidos a partir de residuos plásticos varía según el tipo de plástico, siendo el poliestireno el más favorable, seguido del polietileno de alta densidad y el polietileno de baja densidad, y por último el polietileno tereftalato.

Un tercer estudio es el de Villegas & Zamudio (2022) Titulado, “Influencia de la temperatura y el tamaño de las partículas durante el proceso de pirólisis en el rendimiento del combustible líquido obtenido a partir de residuos de poliestireno expandido (EPS)” determinaron los parámetros óptimos de temperatura de operación y tamaño de las partículas para maximizar la cantidad de producto líquido obtenido. Analizaron las características fisicoquímicas del líquido obtenido en el punto máximo de rendimiento. Para el desarrollo experimental recogieron, lavaron y trituraron muestras de poliestireno expandido. Posteriormente realizaron un pretratamiento en el que la materia prima se calentó a 150°C durante 10 minutos para reducir su volumen manteniendo una masa similar. La muestra fue molida y tamizada en dos tamaños de partículas: 0 a 5 mm y 6 a 10 mm. Utilizaron un reactor discontinuo horizontal con un sistema de vacío, un sistema de enfriamiento y un sistema de recolección y ventilación de gases. El reactor funcionó a una presión de vacío de 260 mmHg durante 3 horas, con una velocidad de calentamiento de 10°C/min. La pirólisis llevaron a cabo a temperaturas de 400, 450, 500 y 550°C, variando con los dos tamaños de partícula mencionados. Las condiciones óptimas para maximizar la producción de líquido establecieron como una temperatura de 550 °C y un tamaño de partícula de 6 a 10 mm. Los rendimientos obtenidos con estas condiciones fueron: 97,8% líquido, 1,2% gases y 1,0% sólidos. El proceso fue validado estadísticamente mediante un análisis de regresión múltiple, concluyendo que tanto la temperatura como el tamaño de partícula tuvieron un efecto estadísticamente significativo en el rendimiento líquido, dado que el valor de p fue menor a 0.020, inferior al nivel de significancia y al coeficiente de determinación múltiple. fue del 89,47%. Finalmente, caracterizaron fisicoquímicamente el producto líquido, concluyendo que el combustible obtenido podría ser aprovechado luego de pasar por un proceso adicional.

Guachamin et al. (2023) en su investigación titulada “Obtención de combustibles a partir de pirólisis de material plástico reciclado de polietileno de alta densidad (PEAD)”,

señalan que el crecimiento descontrolado de desechos plásticos es un grave problema ambiental que contamina los ecosistemas y contribuye al calentamiento global, debido a la resistencia de estos materiales a la biodegradación. Además, la dependencia mundial de los combustibles fósiles tiene un impacto negativo en el medio ambiente, contaminando suelo, aire y agua durante su extracción y producción. Este estudio se enfoca en transformar el polietileno de alta densidad (PEAD), un tipo de plástico reciclado, en combustible como una alternativa para reducir la contaminación por residuos plásticos y proporcionar una nueva fuente de energía. Se analizó el proceso de obtención de combustibles a partir del PEAD mediante pirólisis, una reacción térmica que se llevó a cabo a 380 °C durante dos horas en ausencia de oxígeno. Este procedimiento rompe la estructura molecular del plástico, transformándolo en hidrocarburos más ligeros. Los resultados fueron prometedores, con un rendimiento del 45.565%, y porcentajes de 7.315% para gasolina, 32.901% para keroseno y 20.126% para diésel.

Rejas et al. (2020) en su trabajo titulado Generación de combustibles Líquidos a partir de residuos plásticos seña que él se enfocó en analizar el proceso de pirolisis plástica, una técnica de descomposición térmica que transforma los residuos en una mezcla de hidrocarburos, conocida como petróleo ligero, que puede ser aprovechada como fuente energética. Se utilizaron residuos plásticos divididos en seis categorías: PET, PEAD, PEBD, PP, PS y PVC. Se llevaron a cabo experimentos con cada tipo de plástico, excepto el PVC, en un reactor Batch. Durante los experimentos se monitorizaron variables como la temperatura de operación, el tiempo total de reacción, el volumen y la densidad de los hidrocarburos líquidos obtenidos, la masa de los residuos y, finalmente, se determinó el rendimiento del proceso. De esta manera, los desechos plásticos se transforman en una fuente de energía, beneficiando al medio ambiente.

3.1.2 A nivel nacional

Ramos y Pretell (2021) en su investigación Titulado “Obtención De Combustibles Líquidos A Partir De Residuos De Polietileno De Alta Densidad” Universidad Nacional de Ingeniería, Perú. Determinaron que las condiciones experimentales óptimas para maximizar la producción de productos líquidos son las siguientes: una presión de operación de 34.66 kPa absolutos, una velocidad de calentamiento en el horno de 20 °C/min, una temperatura de operación de 550 °C y un tamaño de partícula en el rango de 4 a 6 cm. Con estas condiciones, se logra un rendimiento del 88 % en productos líquidos, un 10 % en productos gaseosos y un 2 % en residuo sólido (conocido como residuo carbonoso). Es importante destacar que las condiciones de presión y velocidad de calentamiento establecidas son las más adecuadas que se pueden alcanzar con los equipos disponibles. Por lo tanto, se concluye que es viable obtener fracciones líquidas, denominadas combustibles líquidos, a través del proceso de pirólisis al vacío de residuos de polietileno de alta densidad (PEAD). Estas condiciones operativas se caracterizan por ser moderadas en términos de presión (34.66 kPa absolutos) y temperatura de operación (550 °C).se observa la obtención de subproductos, como el residuo carbonoso, con un bajo rendimiento, así como gases incondensables, que no fueron objeto de investigación en este estudio en particular.

Un segundo estudio es el elaborado por Rueda & Lizarazo, (2023). Titulado “Pirólisis de Residuos Plásticos para la producción de combustibles líquidos”, Lima. Mencionan que, en las últimas décadas, los plásticos de un solo uso han sido objeto de preocupación por su elevado consumo y la escasa reincorporación en procesos de reciclaje. La pirólisis de plásticos ha surgido como una solución prometedora para gestionar los desechos plásticos, generando un ciclo de vida más circular y contribuyendo al desarrollo sostenible. Este proyecto de grado se enfoca en estudiar la transformación de los plásticos más comunes en la sede principal de la Universidad Industrial de Santander en un producto

con mayor valor energético a través de la pirólisis. Inicialmente, se evaluó la cantidad mensual de plásticos en los residuos y se identificaron los tipos más comunes mediante la clasificación SPI. Posteriormente, se realizó un análisis fisicoquímico de los polímeros y se desarrollaron modelos matemáticos para prever su comportamiento durante la pirólisis, así como los posibles compuestos químicos en los productos resultantes. Finalmente, se empleó el software Aspen Plus® para simular la pirólisis de los polímeros seleccionados. Los resultados indicaron que la universidad produce mensualmente 60.4 kg de plásticos, siendo el PET, el PEAD y el PP los más prevalentes, con un 54%, 22% y 18% respectivamente. Las simulaciones mostraron que el rendimiento de la fracción líquida disminuye con el aumento de la temperatura de reacción, y que los productos finales están compuestos principalmente por hidrocarburos aromáticos, los cuales son ampliamente usados en nuestra vida diaria.

Cáceres (2018), En su estudio Titulado “Experimentación de la obtención de combustibles líquidos a partir del polietileno de alta densidad”, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima. Señalan que su estudio se enfoca en la producción de combustibles líquidos derivados de desechos de polietileno de alta densidad, aplicando procesos de pirólisis tanto térmica como catalítica. Utilizaron muestras de polietileno de alta densidad posconsumo, las cuales fueron limpiadas, cortadas y tamizadas en tres diferentes tamaños: 2-4 mm, 4-6 mm y 6-8 mm. Los experimentos se realizaron en un reactor tubular vertical bajo condiciones de vacío, con un sistema de condensación para los productos obtenidos. Establecieron temperaturas de reactor de 530°C, 560°C y 590°C, variando el tamaño de las partículas conforme a los tamaños previamente mencionados. Repitieron las condiciones que ofrecieron el mayor rendimiento de líquidos para observar el impacto del uso de un catalizador. Para ello, añadieron 5 gramos de un catalizador de equilibrio de FCC obtenido de una refinería local. Las condiciones óptimas para la producción de combustible líquido en este estudio fueron: una presión de 34.7 kPa abs, una velocidad de calentamiento de

20°C/min, un tamaño de partícula de 4-6 mm, una temperatura de horno de 1000°C y una temperatura de reactor de 560°C. Los rendimientos alcanzados fueron del 89% para líquidos, 7% para gases y 3% para sólidos. El uso del catalizador disminuyó el rendimiento de los productos líquidos, pero mejoró propiedades de transporte, como la viscosidad y el punto de fluidez. En resumen, este estudio estableció las condiciones necesarias para obtener un combustible líquido similar al diésel fósil a partir de la pirólisis del polietileno. El uso de un catalizador generó un producto con un rendimiento mayor de gasolina en detrimento del diésel. Sin embargo, en ambos casos, el producto final no es apto para ser utilizado directamente como combustible automotriz sin un procesamiento adicional.

Villegas & Valery (2022) señalan en su trabajo que En este estudio titulado "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)", Universidad Nacional del Centro del Perú. Tuvieron como objetivo identificar las condiciones óptimas de temperatura de operación y tamaño de partícula para maximizar la producción de líquido. Además, se examinaron las propiedades físico-químicas del líquido obtenido en el punto de máximo rendimiento. Durante la fase experimental, recogieron, lavaron y trituraron las muestras de poliestireno expandido. Posteriormente, realizaron un pretratamiento, calentando la materia prima a 150°C durante 10 minutos para reducir su volumen, manteniendo una masa constante. Las muestras fueron molidas y tamizadas en dos tamaños de partículas: 0-5 mm y 6-10 mm. Se utilizó un reactor horizontal por lotes con un sistema de vacío, un sistema de refrigeración, recolección y ventilación de gases. El reactor operó a una presión de vacío de 260 mmHg durante 3 horas, con una velocidad de calentamiento de 10°C/min. Las pruebas de pirolisis se llevaron a cabo a temperaturas de 400, 450, 500 y 550°C, variando con los dos tamaños de partícula mencionados. Las condiciones óptimas que maximizaron la producción de líquido fueron una temperatura de

550°C y un tamaño de partícula de 6-10 mm. Los rendimientos obtenidos en este proceso fueron: 97.8% líquidos, 1.2% gases y 1.0% sólidos. Además, el análisis estadístico de regresión múltiple validó el proceso, concluyendo que tanto la temperatura como el tamaño de partícula tienen un impacto significativo en el rendimiento del líquido, con un valor $p < 0.020$ y un coeficiente de determinación múltiple de 89.47%. Por último, la caracterización físico-química del producto líquido indicó que el combustible obtenido puede ser utilizado después de un proceso adicional.

Taipe (2022) en su estudio Titulado “Obtención de combustibles a partir de residuos de polipropileno reciclado, mediante pirólisis catalítica”, Universidad de las Fuerzas Armadas. Tuvieron como objetivo demostrar el proceso de transformación del polipropileno reciclado en combustibles a través de la pirólisis catalítica con un catalizador regenerado de la unidad de craqueo catalítico fluidizado (FCC). A lo largo de cinco etapas, regeneraron y caracterizaron el catalizador, se acondicionó la materia prima recolectada de centros de reciclaje, analizaron los parámetros cinéticos del proceso, se caracterizó la fracción líquida obtenida y, finalmente, se sometió dicha fracción a un proceso de destilación. Los resultados mostraron que es viable obtener combustibles líquidos similares a la gasolina y el diésel a partir de polipropileno reciclado, contribuyendo de esta manera a la sostenibilidad ambiental y ofreciendo una solución alternativa para el manejo de residuos plásticos.

3.1.3 A nivel regional y local

Se ha revisado la bibliografía sobre el tema en varios sitios web, repositorios Universitarios revista Google y otros sitios relevantes y hasta la fecha, no se han identificado estudios locales específicos relacionados con la "Obtención de Combustible Líquido con Polietileno de Alta Densidad y Tereftalato mediante Procesos de Pirólisis en el Distrito de Umachiri - Puno, 2024". A pesar de la creciente preocupación por la gestión de residuos plásticos y la búsqueda de alternativas sostenibles en el ámbito local, parece haber una

notable ausencia de investigaciones enfocadas en el proceso de pirólisis y sus aplicaciones específicas en la obtención de combustible líquido en la región de Umachiri, Puno. Esta falta de estudios locales resalta la importancia de la investigación propuesta para llenar este vacío de conocimiento y evaluar la viabilidad y los beneficios potenciales de esta tecnología en el contexto de esta comunidad.

3.2. Bases teóricas

3.2.1 Plástico

Helmenstine, (2020) y Eljarrat, (2019) señalan que el plástico, un polímero que puede ser sintético o semisintético, está compuesto principalmente por carbono e hidrógeno, pero también puede contener otros compuestos como: oxígeno, nitrógeno y cloro. Generalmente, se sintetiza a partir de derivados del petróleo y se le añaden diversos aditivos químicos que pueden constituir más del 50 % de su peso. La producción de plásticos comenzó en 1884 con la creación de la película fotográfica por John Hyatt, y ha ido evolucionando desde entonces. En 1907, se creó la baquelita, el primer plástico totalmente sintético, y en la década de se desarrolló el polietileno. (British Petroleum, 2019).

3.2.1.1. Tipos de plástico

Según Crudo (2019) los plásticos se dividen principalmente en dos categorías: termoplásticos y termoestables. Los termoplásticos, al calentarse, no experimentan alteraciones en su estructura química, lo que permite que puedan ser remodelados. Por otro lado, los termoestables sí experimentan cambios químicos cuando se calientan y, una vez que se solidifican, no pueden ser modificados. No obstante, el tipo de plásticos más comunes son los siguiente:

- Tereftalato de polietileno: Conocido como PET, este plástico es muy popular debido a sus propiedades como transparencia, capacidad de aceptar colorantes, resistencia, elasticidad y ligereza. Principalmente, se utiliza para fabricar botellas de agua y bebidas.








(Caceres, 2018). Además, es un termoplástico utilizado especialmente en la fabricación de botellas de plástico. Su estructura molecular está compuesta por unidades repetitivas de tereftalato que forman una estructura cristalina bien definida y organizada. Esta organización molecular juega un papel crucial durante la pirólisis, determinando las temperaturas óptimas para su descomposición y los productos resultantes. Temperaturas más altas favorecen la producción de gases y líquidos volátiles que pueden ser recolectados como combustibles líquidos. (Mariño & Suarez, 2018)

- Polietileno de Alta Densidad: El PEAD es un plástico que combina rigidez con cierta flexibilidad y es extremadamente resistente a condiciones adversas e impactos químicos. Se emplea en la producción de envases para productos químicos y aceites de motor (Caceres, 2018). Está formado por cadenas repetitivas de moléculas de etileno. Durante la pirólisis, estas regiones cristalinas y amorfas afectan significativamente cómo responde el PEAD al calor. Las áreas cristalinas tienden a descomponerse a temperaturas elevadas, liberando principalmente gases y líquidos volátiles que son útiles como combustibles líquidos. En contraste, las áreas amorfas pueden generar más residuos sólidos carbonosos cuando se calientan a temperaturas más bajas, lo cual puede reducir la eficiencia del proceso general. (Suasnavas, 2017)

- Policloruro de vinilo: El PVC, que se compone de carbono y cloro, es considerado el plástico más peligroso. Puede ser rígido o flexible, es muy resistente, de baja densidad y dúctil. Se utiliza en tuberías, tarjetas de crédito, recubrimientos de cables, entre otros usos (Juste, 2020)

- Polietileno de baja densidad: El LDPE es un plástico flexible y resistente a químicos, cuya transparencia varía según el espesor. Se utiliza en la fabricación de papel burbuja y papel film (Hardin, 2021) Además, se presenta una ilustración que muestra la distribución mundial de la demanda de plásticos según señala NTE INEN 2633 (2022)

Tabla 2*Tipos de plásticos más comunes*

CÓDIGO DE RESINA	MATERIAL	PRODUCTOS
	Polietileno tereftalato (PET, PETE)	<ul style="list-style-type: none"> • Botellas plásticas, enjuague bucal, envase de salsa de tomate y aderezo. • Frascos para mantequilla de maní y mermelada. • Alfombras, correas, DVD y molduras de ingeniería.
	Polietileno de alta densidad (PEAD, PEAD)	<ul style="list-style-type: none"> • Envases para leche, agua, jugos, cosméticos, champú y detergentes. • Bolsa para alimentos. • Fundas de cereales y cubierta de alambres y cables.
	Cloruro de polivinilo (PVC, Vinyl)	<ul style="list-style-type: none"> • PVC tuberías, marcos de ventana, baltas. • Bolsas de sangre y tubos médicos, aislamiento de hilos y cables respaldo de alfombras y suelos.
	Polietileno de baja densidad (PE-BD, LDPE)	<ul style="list-style-type: none"> • Bolsas para alimentos congelados y envolturas para basura. • Recubrimiento para cartones de leche y vasos de bebidas calientes y frías. Tapas de contenedores y de botes de basura. • Juguetes y tuberías.
	Polipropileno (PP)	<ul style="list-style-type: none"> • Envases de alimentos, contenedores para yogurt, margarina y comidas para llevar. • Botellas de medicamentos y cosméticos. • Tapas de botella y cierres • Aplicaciones en automóviles, tales como cajas de batería, luces de señal, cables de batería, escobas y cepillos.
	Poliestireno (PS)	<ul style="list-style-type: none"> • Artículo como tazas, platos, cubiertos, recipientes con bisagras. • Cajas de discos compactos y botellas de aspirina. • Cámaras o cajas de cinta de videos. • Molduras de plástico (como producto de reemplazo de madera).
	OTROS	<ul style="list-style-type: none"> • Esta elaborado con una resina de poliuretano (PU), acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), policarbonato (PC) y resina acetal. • Botellas de agua y algunas botellas de jugos cítricos. • Botellas y aplicaciones en mobiliario plástico. • Discos compactos, techo traslucido y armazones.

Fuente: NTE INEN 2633 (2022)

3.2.1.2 Propiedades químicas y fisicoquímicas del plástico

El PET es una resina termoplástica que, a nivel industrial, se produce mediante la reacción de polimerización de dos petroquímicos secundarios: el monómero etilenglicol y el monómero ácido tereftálico o el éster metílico del ácido tereftálico (Munoz, 2012)

➤ Resistencia al ataque químico

La resistencia del PET al ataque químico se debe a la naturaleza de los grupos funcionales de sus monómeros y su estructura. Este material muestra resistencia a hidrocarburos, alcoholes, grasas y aceites, éteres, bases diluidas y ácidos (Elias & Jurado, 2012). El anillo bencénico no solo aumenta la rigidez, sino que también proporciona una mayor resistencia química a la saponificación, que es la reacción para la formación de jabones. Esto se debe principalmente a la disociación de las grasas en un medio alcalino, separándose en glicerina y ácidos grasos (Beltran, 2012)

➤ Solubilidad

El PET, conocido por su sigla en inglés como polietilentereftalato, presenta una notable resistencia a los solventes orgánicos, aunque puede mostrar cierta solubilidad en solventes específicos como cetonas, compuestos clorados, alcoholes de cuatro u ocho carbonos, solventes halogenados, compuestos aromáticos, así como cetonas de bajo peso molecular y bases (Suasnavas, 2017) Este comportamiento se debe a la naturaleza de sus grupos funcionales y su estructura molecular.

Durante el proceso de fabricación y manipulación del PET, es esencial considerar su carácter higroscópico. En estado fundido, el PET es particularmente sensible a la hidrólisis, un proceso químico donde las moléculas del polímero pueden descomponerse en presencia de agua, afectando así sus propiedades y rendimiento (Maldonado, 2023)

➤ Resistencia al envejecimiento

La estructura molecular del PET se ve afectada con el tiempo de manera irreversible debido a diversos factores ambientales externos, como la temperatura, la radiación solar, la humedad y los contaminantes presentes en el aire. Estas condiciones pueden ocasionar alteraciones visibles en el material, como cambios en su coloración, pérdida de humedad, variaciones en sus dimensiones y debilitamiento de sus propiedades mecánicas. Incluso pueden surgir grietas o fisuras que afecten su integridad. A pesar de estos desafíos, gracias a su naturaleza cristalina y su transparencia, el PET generalmente conserva una notable resistencia frente al envejecimiento (Beltran, 2012)

➤ Estabilidad térmica

Los poliésteres, como el PET, tienden a perder sus propiedades cuando se exponen a temperaturas superiores a los 70 grados Celsius, ya que el calor puede desencadenar cambios químicos en la estructura del plástico. Estos cambios incluyen procesos como reacciones de eliminación, despolimerización, descomposición, fragmentación y modificaciones en los grupos funcionales presentes. Para permitir el llenado en caliente, se han realizado mejoras en los equipos mediante modificaciones específicas. Aunque el PET tiene una temperatura máxima de resistencia de aproximadamente 71 °C, el PET cristalizado puede soportar temperaturas de hasta 230 °C (Beltran, 2012)

➤ Permeabilidad

La cualidad de barrera de un material se refiere a su capacidad para evitar el paso de sustancias a través de él, en contraste con la permeabilidad, que indica la cantidad de un gas específico que puede atravesar el material en una unidad de superficie durante cierto tiempo y bajo condiciones determinadas (Munoz, 2012). En

la industria alimentaria, es crucial emplear materiales con excelentes propiedades de barrera para garantizar la calidad y la durabilidad de los productos. Por lo general, cuanto menor sea la permeabilidad de un material a gases como el vapor de agua, el oxígeno, y en menor medida, nitrógeno y dióxido de carbono, mejor será su capacidad de actuar como barrera. El PET, por ejemplo, muestra una alta eficacia como barrera frente al dióxido de carbono, el oxígeno y la humedad (Sánchez, M., & Paredes, P., 2014)

➤ Densidad

La densidad de un material plástico tiene una relación directa con su eficiencia en la fabricación, ya que afecta significativamente el peso del producto final. En la industria del plástico, la densidad es un factor económico crucial que influye en la elección entre diferentes tipos de plásticos. Por ejemplo, el PET en su estado amorfo exhibe una densidad que varía típicamente entre 1.33 y 1.37 g/cm³, mientras que en su estado cristalino esta densidad puede oscilar entre 1.45 y 1.51 g/cm³. (Beltran, 2012)

La elección del estado del PET (amorfo o cristalino) para aplicaciones específicas depende de las propiedades físicas deseadas del producto final, como la resistencia mecánica y la transparencia. La densidad también juega un papel crucial en la optimización de los costos de producción y en la capacidad de respuesta a las necesidades de diseño y fabricación en diversas industrias, desde envases hasta componentes técnicos. (Suasnavas, 2017)

➤ Conductividad térmica

La conductividad térmica es una medida de la capacidad de un material para conducir calor a través de sí mismo. En el contexto de los materiales plásticos, esta propiedad indica cuánto calor pueden transmitir. Es crucial para determinar el

aislamiento térmico de un material, siendo preferibles aquellos con valores bajos de conductividad térmica, ya que indican una menor transferencia de calor a través del material (Suasnavas, 2017)

Por ejemplo, el PET presenta una conductividad térmica de aproximadamente $0.24 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (Maldonado, 2023) lo cual lo posiciona como un material con buen aislamiento térmico en comparación con otros plásticos. Esta característica es especialmente relevante en aplicaciones donde se requiere mantener la temperatura constante, como en envases para alimentos o en componentes electrónicos sensibles al calor. La conductividad térmica del PET influye directamente en su eficiencia energética y en su capacidad para conservar la temperatura de manera efectiva en diversas condiciones ambientales.

➤ Absorción de agua

La absorción de agua en los plásticos se refiere a la capacidad del material para retener agua en su estructura después de un período prolongado en un ambiente húmedo, lo cual puede influir significativamente en su peso. Esta característica es crucial en la fabricación de piezas, ya que una alta absorción de agua puede provocar cambios en las dimensiones de las piezas. (Beltran, 2012)

El PET, por ejemplo, presenta una absorción de agua muy baja, generalmente menor al 0.7 % después de 24 horas de exposición Muñoz (2012) Esto indica que el PET es bastante resistente a absorber agua en comparación con otros plásticos, lo cual es una ventaja en aplicaciones donde se requiere estabilidad dimensional y resistencia a la humedad. Esta propiedad es particularmente relevante en sectores como la industria automotriz y la fabricación de envases, donde mantener las dimensiones y propiedades mecánicas del material es crucial para su desempeño y durabilidad. (Caceres, 2018)

➤ Propiedades ópticas

Las propiedades ópticas de un material están estrechamente ligadas a su morfología y estructura interna. Dos de las propiedades ópticas más importantes son el índice de refracción y la transmisión de luz, las cuales tienen un impacto significativo en la turbidez, brillo y transparencia del material. En términos generales, los materiales amorfos tienden a ser más transparentes cuando están libres de impurezas, mientras que aquellos con estructuras cristalinas pueden interferir con la transmisión de la luz. (Suasnavas, 2017)

Por ejemplo, el PET exhibe una alta transmisión de luz del 89% y un índice de refracción de 1.576 Sánchez & Paredes(2014) Esto indica que el PET es bastante transparente en su forma amorfa cuando está libre de defectos o impurezas significativas, lo cual lo hace ideal para aplicaciones donde se requiere claridad óptica, como en envases transparentes y láminas para fines de empaque. La capacidad de transmitir luz y su índice de refracción también son consideraciones importantes en el diseño de materiales para aplicaciones ópticas y visuales. (Suasnavas, 2017)

3.2.1.3. Residuos Plásticos

Filgueira (2021) señala que, durante las últimas décadas, el aumento del bienestar en la sociedad moderna ha impulsado un incremento significativo en la producción de una variedad de productos, generando así residuos indirectos. Entre estos, los plásticos han experimentado un rápido crecimiento debido a su versatilidad, amplio rango de aplicaciones y costo relativamente bajo. Aunque la cantidad de residuos plásticos es menor en comparación con la producción total de plásticos, una gran parte de estos desechos se encuentra en los residuos sólidos municipales, así como en los residuos generados en la distribución, agricultura, construcción, demolición, muebles, artículos para el hogar, automotrices, electrónicos, eléctricos y médicos. Hasta hace poco, los productos desechados

se consideraban basura, pero hoy en día, muchos de estos residuos se reintegran en la economía de mercado como recursos Eljarrat, (2019) indica que los plásticos son materiales ampliamente utilizados que pueden tardar hasta 300 años en empezar a degradarse, consumiendo aproximadamente un millón de bolsas por minuto en todo el mundo. Además, estima que el 5% de la producción mundial de derivados del petróleo se utiliza para fabricar plásticos, de los cuales solo el 1% se recicla y el resto termina en vertederos, ríos, mares, entre otros lugares.

3.2.1.4. Riesgos a la salud y medio ambiente

El plástico PET no produce contaminantes al ser inerte en el medio ambiente, su disposición inadecuada resulta en un considerable impacto visual debido a su acumulación en la superficie terrestre. Esta mala gestión de los residuos plásticos facilita su llegada a fuentes hídricas, incrementando así los riesgos medioambientales. La situación se agrava cuando los plásticos se mezclan con otros tipos de residuos, como restos de materia orgánica, lo que dificulta su tratamiento adecuado, reutilización o transformación. Estos problemas son el resultado de prácticas irresponsables en la disposición de desechos plásticos por parte de las personas, complicando aún más la gestión de estos materiales y exacerbando sus efectos negativos en el medio ambiente y la salud pública (Beltran, 2012)

El principal problema con los residuos plásticos que se acumulan en la superficie terrestre o en cuerpos de agua es su extremadamente lenta degradación. A pesar de que estos residuos plásticos no generan contaminantes de inmediato, pueden perdurar en el entorno durante miles de años. Esta durabilidad contrasta significativamente con otros tipos de residuos como el papel, el cartón, o incluso el metal, los cuales se descomponen en mucho menos tiempo debido a procesos como la oxidación. Esta prolongada persistencia de los plásticos en el medio ambiente plantea serios desafíos y preocupaciones sobre su manejo y su impacto ecológico (Ramírez, 2022).

La tecnología ha trabajado en la creación de plásticos más livianos y biodegradables con el objetivo de reducir su impacto ambiental. A pesar de estos esfuerzos, no se ha logrado una disminución significativa en el volumen de residuos plásticos, especialmente en el caso de las botellas de PET, que siguen siendo un problema debido a su gran presencia en el medio ambiente. Como resultado, el reciclaje mecánico se ha convertido en una alternativa más efectiva y rentable. Este método ha experimentado un aumento considerable en su implementación durante los últimos años, en parte porque proporciona una fuente de ingresos para personas que no tienen un empleo estable, convirtiéndose así en una solución tanto ambiental como económica (Caceres, 2018)

3.2.2. Pirólisis

Dogue et al. (2021) establece que la pirólisis es el proceso de descomposición de polímeros a altas temperaturas en condiciones anaeróbicas para obtener productos de valor, como combustibles y aceites. Esta técnica, considerada un método de reciclaje terciario o de conversión de residuos plásticos en combustibles, monómeros u otros materiales útiles mediante procesos de craqueo térmico y catalítico, es aplicable tanto a termoplásticos como a termoestables, transformándolos en combustibles y productos químicos de alta calidad.

Las últimas innovaciones en tratamientos térmicos incluyen la pirólisis y la gasificación, que se llevan a cabo a temperaturas elevadas. La distinción principal entre ambas es que la pirólisis se realiza en un entorno sin oxígeno, mientras que la gasificación requiere la introducción de un agente que aporte oxígeno al proceso. (Rojas, 2023)

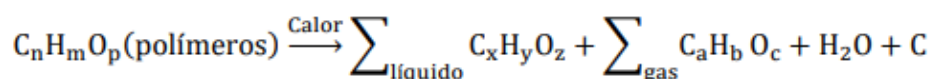
La pirólisis, también conocida como craqueo de polímeros, presenta ventajas significativas:

Permite tratar residuos plásticos que son difíciles de reciclar mediante otros métodos, generando productos reutilizables con amplia aceptación en el mercado.

Es capaz de procesar plásticos sin necesidad de lavado previo o clasificación, incluyendo aquellos con altos niveles de contaminación, como la película de mantillo que puede contener hasta un 20% de suciedad adherida (Filgueira, 2021)

Aunque el reciclaje pirolítico de plásticos se ha implementado a nivel comercial de forma limitada, el desarrollo y la mejora de estas tecnologías de reciclaje en los últimos años presenta un gran potencial comercial.

De este modo y de acuerdo a lo anterior Maqsoodn et al (2021) indica que existen distintas categorías de pirólisis, que se diferencian por su temperatura de operación, siendo estas: la pirólisis lenta, la pirólisis rápida, y la pirólisis ultra rápida o flash. En el primer caso, el tiempo que el gas permanece en el sistema varía de 450 a 550 segundos, con una tasa de incremento de temperatura de 0,1 a 1 °C por segundo. En cambio, la pirólisis rápida tiene un tiempo de residencia mucho menor, de 0,5 a 10 segundos, con un ratio de calentamiento de 10 a 200 °C por segundo, produciendo más líquido combustible y menos residuos sólidos y gases que la pirólisis lenta (Beltran, 2012) Por último, la pirólisis flash trabaja con tasas de incremento de temperatura superiores a 1.000 °C por segundo y tiempos de residencia de 0,5 segundos he aquí como se demuestra su formulación:



Fuente: Maqsoodn et al. (2021)

La ecuación general tiene la siguiente forma:

3. **$C_n H_m O_p$ (polímeros)**: Representa la fórmula general de los polímeros, que están compuestos por carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O). El subíndice n, m, y p indican las proporciones de estos elementos en la estructura polimérica.
4. **Calor**→: Indica que el proceso se lleva a cabo mediante la aplicación de calor.

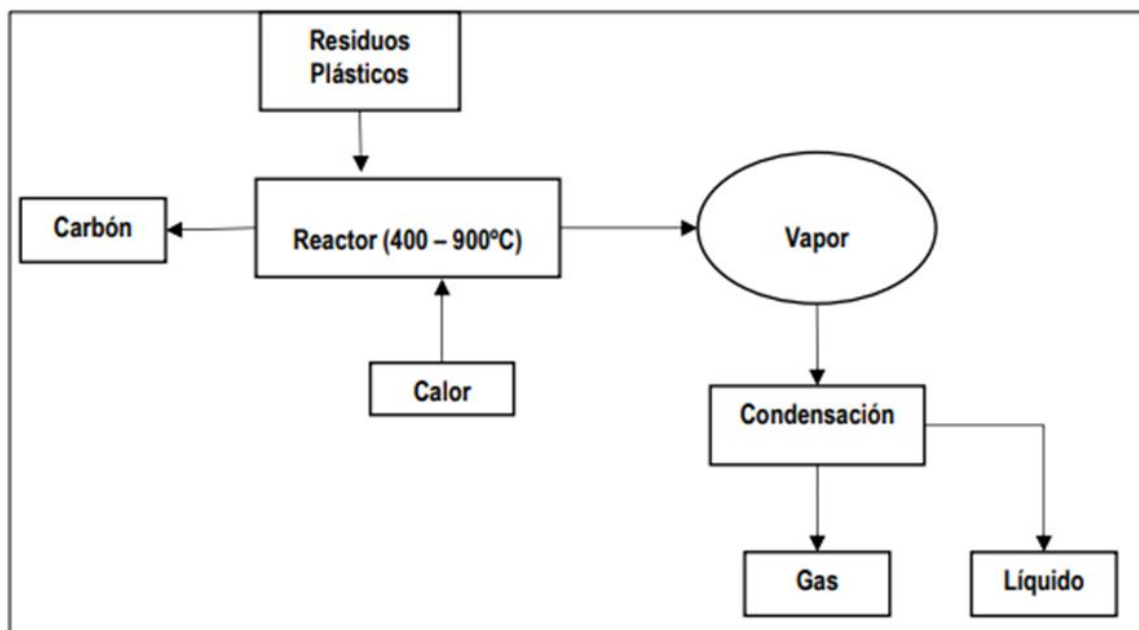
5. ***Σliquido*** $C_xH_yO_z$: Esta suma representa los productos líquidos que se obtienen, que consisten en compuestos orgánicos con diversas proporciones de carbono, hidrógeno y oxígeno.
6. ***Σgas*** $C_aH_bO_c + H_2O + C$: Esta parte de la ecuación representa los productos gaseosos generados, que incluyen una mezcla de gases con diferentes proporciones de carbono, hidrógeno y oxígeno, además de vapor de agua (H_2O) y carbono elemental (C).

6.2.2.1. Tipos de Reactores Pirolíticos

Qureshi et al. (2021) señala que la selección del tipo de reactor utilizado en el proceso de pirólisis es un factor fundamental que influye en la producción de productos. A la hora de tomar una decisión acerca del reactor adecuado, es esencial considerar dos criterios esenciales: la transferencia de masa y la transferencia de calor. Cada tipo de equipo tiene sus ventajas y desventajas, pero la elección final dependerá del tipo de producto deseado y las características de las materias primas utilizadas.

Figura 1

Proceso de pirólisis en un reactor



Fuente: Coronel, (2014)

- **Reactor de Lecho Fijo:**

Este reactor implica colocar el material de alimentación en un lecho estático y calentarlo externamente para iniciar la pirólisis. El calor se aplica desde una fuente externa como resistencias eléctricas o quemadores de combustible. El material se descompone gradualmente con la temperatura, generando gases, líquidos y residuos sólidos. (Beltran, 2012)

- **Reactor de Lecho Fluidizado:**

En este tipo de reactor, el material se suspende en un flujo ascendente de gas caliente o vapor. Mejora la transferencia de calor al mezclar continuamente el material en el gas caliente, facilitando así una descomposición más rápida y uniforme. (Carranza & Marreros, 2020)

- **Reactor Discontinuo o Batch de Acero:**

Un reactor discontinuo es un contenedor cerrado donde se mezclan y reaccionan los productos químicos. Se llama "discontinuo" porque los reactivos se añaden al principio, se lleva a cabo la reacción, y después se extraen los productos. (British Petroleum, 2019)

- **Reactor de horno rotatorio con arena como portador de calor:**

Este tipo de reactor utiliza un tambor giratorio para mover el material a través del sistema, mientras que la arena caliente se emplea para transferir el calor necesario para la pirólisis. (Carranza & Marreros, 2020)

- **Reactor semi discontinuo:**

Un reactor semi discontinuo es un tipo de reactor en el que algunos reactivos se agregan de forma continua o en intervalos mientras que otros permanecen en el reactor durante un tiempo específico. Este método permite un control más preciso sobre la reacción y puede mejorar la eficiencia del proceso. (Carranza & Marreros, 2020)

6.2.2.2. *Productos de la pirólisis*

La pirólisis de plásticos resulta en tres principales productos: una fase líquida, una sólida, y una gaseosa. La fase líquida, caracterizada por su alto contenido de energía, puede ser comparada con el diésel y utilizada como fuente de energía. Por otro lado, la fase sólida se presenta como una especie de carbón residual de los plásticos que no se han degradado completamente, y puede ser empleada como material absorbente. En cuanto a la fase gaseosa, esta se compone de hidrocarburos de baja masa molecular que pueden ser reaprovechados como fuente de energía para generar el calor necesario para el proceso de pirólisis, completando así un ciclo cerrado, Papari et al. (2021) menciona que la composición de los plásticos que se someten a pirólisis determinará los diferentes compuestos que se producirán durante el proceso.

6.2.2.3. *Influencia de parámetros en la pirólisis del plástico*

Existen varios factores que impactan en el proceso de pirólisis de plástico, incluyendo la temperatura, el tiempo de permanencia, la presión, el tipo de reactor, la naturaleza y velocidad del gas utilizado, así como el uso de un catalizador. Para obtener una mayor proporción de gas y carbón como productos, se prefieren temperaturas por encima de los 500 °C, mientras que, para maximizar la eficiencia en la producción de líquidos, el rango óptimo se sitúa entre los 300 y 500 °C. La presión y el tiempo de permanencia son parámetros que dependen de la temperatura y también influyen en los resultados de la pirólisis. Un aumento en la presión conduce a una mayor producción de gas y tiene un efecto en el peso molecular de los productos líquidos y gaseosos Sharuddin et al. (2018). Los catalizadores tienen la capacidad de reducir la temperatura requerida en el reactor, lo que a su vez reduce los costos operativos. Entre los catalizadores más investigados se encuentran los catalizadores bifuncionales, que pueden llevar a cabo tanto reacciones de craqueo como de deshidrogenación, y muchos de ellos se utilizan de manera similar en plantas de refinería.

Algunos ejemplos comunes de catalizadores son la zeolita, la modernita y el cobre. (Díaz, 2022)

6.2.2.4. Combustible líquido de pirólisis del plástico

La composición del líquido resultante de la pirólisis de plástico se verá afectada por la estructura y la composición química de los polímeros que están siendo descompuestos. Cuando se utiliza un plástico de alta calidad como materia prima y se somete a un proceso de pirólisis a alrededor de 500 °C, se logra una optimización de la fracción líquida, alcanzando entre un 80% y un 85% del peso por volumen de la materia prima de entrada. Por lo tanto, la presencia de cadenas de carbono saturadas en mayor cantidad conduce a una mayor eficiencia en la producción de líquido en el proceso. Además, otros factores que tienen un impacto incluyen la fracción volátil y el contenido de cenizas. De acuerdo con la investigación de Maqsood et al. (2021) , la eficacia, cantidad y calidad del aceite líquido producido, que consiste en una mezcla con alrededor de 300 a 400 componentes diferentes, se determinan principalmente mediante variables como la temperatura, la tasa de calentamiento y el tiempo de retención. El combustible líquido obtenido a través del pirólisis del plástico tiene una variedad de aplicaciones, incluyendo su uso en generadores, hornos, bombas agrícolas y otras utilidades.

6.2.2.5. Implicaciones de la pirolisis

La comprensión detallada de la estructura molecular del PEAD y del PET es esencial para optimizar la pirólisis y obtener combustibles líquidos de alta calidad de manera eficiente. La capacidad para ajustar con precisión las condiciones de temperatura, presión y velocidad de calentamiento durante la pirólisis es crucial para maximizar el rendimiento de productos líquidos útiles y minimizar la formación de residuos sólidos no deseados. Este enfoque no solo mejora la eficiencia del proceso, sino que también amplía las posibilidades de aprovechamiento de plásticos como recursos energéticos renovables. (Juste, 2020)

a. Temperatura

La temperatura juega un papel fundamental en el proceso de pirólisis de polímeros como el PEAD y el PET, se utilizan típicamente temperaturas elevadas, que oscilan entre 300°C y 800°C, para inducir la descomposición térmica de estos materiales; estas altas temperaturas facilitan la ruptura de los enlaces moleculares en los polímeros, lo cual promueve la liberación de gases y líquidos volátiles ricos en hidrocarburos; finalmente estos productos son esenciales como materias primas para la producción de combustibles líquidos. (Pinargote & Sánchez, 2023)

En contraste, temperaturas más bajas que 300°C pueden no ser suficientes para descomponer completamente los polímeros, lo que puede resultar en la formación de residuos sólidos carbonosos o alquitranes. Estos residuos no solo reducen la eficiencia del proceso de pirólisis, sino que también pueden requerir tratamientos adicionales para su manejo o recuperación. (Marcilla & Beltran, 1990)

Es crucial seleccionar con precisión la temperatura de pirólisis para maximizar el rendimiento de productos líquidos útiles y minimizar la generación de residuos sólidos. Además, la temperatura también influye en la distribución de productos específicos dentro del espectro de hidrocarburos, lo cual es fundamental para optimizar la calidad y el valor comercial de los combustibles líquidos obtenidos. (Coronel, 2014)

b. Presión

Aunque la presión no tiene el mismo impacto crítico que la temperatura en la pirólisis de polímeros, desempeña un papel significativo en varios aspectos del proceso. La presión puede afectar las velocidades de las reacciones químicas, la estabilidad de los productos intermedios y la distribución de los productos finales.

En resumen, aunque la presión no es tan crucial como la temperatura en la pirólisis de polímeros, su adecuado control y ajuste son fundamentales para optimizar la producción

de combustibles líquidos y otros productos derivados de plásticos mediante procesos de pirólisis. La selección cuidadosa de la presión correcta es esencial para maximizar la eficiencia del proceso y asegurar la calidad óptima de los productos finales obtenidos. (Llopis & Macia, 2020)

c. **Velocidad de calentamiento**

La rapidez con la que se incrementa la temperatura del material durante la pirólisis es un factor crucial que influye directamente en la eficacia del proceso. Este parámetro determina cómo se lleva al material desde la temperatura ambiente hasta el punto crítico necesario para iniciar la descomposición térmica. (Beltran, 2012)

Controlar adecuadamente la velocidad de calentamiento es crucial para maximizar tanto la calidad como la cantidad de los productos líquidos deseados. Este control implica ajustar los parámetros de calentamiento de manera que se optimice la conversión de polímeros en productos útiles, minimizando la generación de subproductos no deseados como los residuos sólidos. La optimización de la velocidad de calentamiento es fundamental para garantizar la eficiencia económica y ambiental de los procesos de pirólisis aplicados al PEAD y al PET en la obtención de combustibles líquidos. (Llopis & Macia, 2020)

6.2.2.6. *Importancia en la Pirólisis*

El proceso de pirólisis para convertir PEAD y PET en combustibles líquidos implica una serie de reacciones químicas complejas, que pueden incluir tanto reacciones endotérmicas como exotérmicas. La gestión efectiva de la energía en estas reacciones es crucial para la eficiencia del proceso. A continuación, se menciona algunos parámetros a tomar en cuenta:

Control de la Temperatura:

- **Endotérmicas:** Durante las etapas endotérmicas, es vital proporcionar suficiente calor para mantener la temperatura necesaria para la descomposición del polímero. Esto se logra mediante el uso de reactores calentados externamente. Además,

requieren la absorción de energía en forma de calor para suceder. En estas reacciones, los productos tienen más energía que los reactivos, por lo que se necesita un aporte constante de energía para romper los enlaces de las moléculas iniciales y formar nuevos enlaces en los productos. Además, estas reacciones absorben calor del entorno, disminuyendo la temperatura del entorno. (Beltran, 2012)

- **Exotérmicas:** Las reacciones exotérmicas pueden generar calor adicional, que puede ser aprovechado para mantener la temperatura del proceso o incluso para reducir el consumo de energía externa. Liberan energía en forma de calor, los productos tienen menos energía que los reactivos, resultando en la liberación de energía al entorno. (Carranza & Marreros, 2020)

Equilibrio Energético:

- Mantener un equilibrio entre las reacciones endotérmicas y exotérmicas es crucial para la estabilidad del proceso de pirólisis. El diseño del reactor y el control del proceso deben considerar este equilibrio para optimizar la eficiencia energética.

Esta teoría proporciona una base sólida sobre los tipos de reacciones que se encuentran en el proceso de pirólisis y cómo su manejo adecuado es crucial para la eficiencia y sostenibilidad del proceso en la obtención de combustibles líquidos a partir de PEAD y PET.

6.2.2.7. Aspectos e impactos ambientales de la pirolisis

Cortes & Jaimes (2019) señalan que la pirolisis, un proceso que implica la descomposición térmica de materiales en ausencia de oxígeno, tiene implicaciones significativas en los campos ambientales y en la evaluación de los impactos ambientales, debido a su importancia en la gestión de residuos y la producción de energía.

La pirolisis se considera un enfoque prometedor para el manejo sostenible de varios tipos de residuos, incluyendo los plásticos y la biomasa. Permite la transformación de residuos en productos útiles como bio-aceite, gas de síntesis y carbón, reduciendo así la

acumulación de desechos en vertederos y disminuyendo la emisión de gases de efecto invernadero. Este proceso puede ser parte de una economía circular, donde los materiales se reciclan y reutilizan, minimizando el impacto ambiental. En este sentido a través de este proceso se puede establecer;

- Reducción de residuos: La pirolisis convierte residuos sólidos en materiales más manejables o en fuentes de energía, reduciendo la cantidad de residuos destinados a vertederos.
- Emisiones: Si bien la pirolisis puede generar emisiones, estas suelen ser menores comparadas con la incineración tradicional. La clave está en un manejo adecuado y en tecnologías de control de emisiones.
- Producción de energía: La conversión de residuos en bio-aceite o gas de síntesis a través de la pirolisis puede ser una fuente de energía renovable, lo que disminuye la dependencia de los combustibles fósiles.
- Impacto en la biodiversidad: Al reducir la necesidad de vertederos, la pirolisis puede disminuir el impacto sobre la biodiversidad y los ecosistemas locales.
- Gestión de riesgos: La pirolisis debe ser manejada cuidadosamente para minimizar los riesgos de contaminación y garantizar que los subproductos sean seguros y manejables.

La importancia de la pirolisis en los aspectos e impactos ambientales radica en su potencial para proporcionar soluciones sostenibles al problema de los residuos, contribuyendo a la mitigación del cambio climático y promoviendo prácticas ambientales más sostenibles. Sin embargo, es crucial considerar y manejar adecuadamente los riesgos y desafíos asociados a este proceso. (Papari et al., 2021)

6.2.2.8. Impacto Ambiental del PET y PEAD

En términos ambientales, el PET según Alesmar et al. (2008) se destaca como una de las resinas más aptas para el reciclaje, identificada con el símbolo de reciclaje número "1", consistente en tres flechas que forman un triángulo, ubicado usualmente en la base del envase. Una vez reciclado, este material se utiliza principalmente para la producción de fibras textiles. Estas fibras recicladas se emplean en una variedad de productos como alfombras, cuerdas, cepillos, escobas, telas para ropa, calzado y camisetas. Sin embargo, es importante mencionar que el PET reciclado generalmente no se reutiliza para la fabricación de nuevos envases que estén en contacto directo y continuo con alimentos o bebidas, detergentes, tuberías, juguetes y en aplicaciones de construcción.

Maldonado, (2023) señala que la producción del PET implica un proceso químico conocido como policondensación, comenzando con la mezcla de ácido tereftálico y etilenglicol. Estos ingredientes clave reaccionan a través de la esterificación, donde el ácido tereftálico se une al etilenglicol, asistido por un catalizador como el antimonio, formando monoetilen tereftalato (MEP).

6.2.3. Los Combustibles

Los combustibles son sustancias obtenidas tanto de fuentes naturales como artificiales mediante procesos humanos. Pueden encontrarse en formas sólida, líquida y gaseosa, y al combinarse con oxígeno, generan calor en forma de fuego a través de reacciones químicas. Entre los combustibles sólidos de origen natural se incluyen la madera y el carbón mineral, mientras que los producidos por el ser humano abarcan el carbón vegetal, el aserrín, los pellets y la cáscara de arroz. Los combustibles líquidos naturales se destacan por el petróleo, y a través de procesos mecánicos se obtienen productos como la gasolina, el biodiésel y el alcohol. En cuanto a los combustibles en estado gaseoso, el gas

natural es un ejemplo natural, mientras que el GLP y el biogás son ejemplos de combustibles elaborados (Carranza & Marreros, 2020)

6.2.2.9. *Propiedades fisicoquímicas de los combustibles*

Las propiedades físicas y características de los combustibles crudos están influenciadas por la cantidad y la condición de las resinas y asfáltenos presentes en su composición. Las características físicas que se evalúan regularmente en los combustibles crudos y refinados son objeto de un análisis detallado en diversos estudios (Carranza & Marreros, 2020)

- **Color:** El color del petróleo puede variar ampliamente, desde tonalidades amarillas hasta rojo pardo. Los tonos amarillos suelen indicar un bajo peso específico, generalmente entre 0.77 y 0.79 g/ml, lo que sugiere que estos combustibles pueden tener propiedades que facilitan la producción de derivados de alta calidad. Por otro lado, los hidrocarburos con tonalidad ámbar suelen tener un peso específico más moderado, que varía entre 0.79 y 0.82 g/ml. Los combustibles con tonalidades más oscuras suelen ser más pesados y pueden indicar una mayor concentración de asfálticos.
- **Densidad:** Este parámetro se refiere a la masa por unidad de volumen de un material en condiciones específicas de temperatura. La densidad es una medida importante para entender la compactación y la relación de masa de los hidrocarburos.
- **Densidad relativa:** Es la comparación entre el peso de un material y el peso de una cantidad igual de agua a diferentes temperaturas. Este dato es crucial para evaluar la densidad del petróleo en comparación con el agua, lo que puede indicar la calidad y pureza del producto.

Estas propiedades físicas son fundamentales para la industria de los combustibles, especialmente en términos de calidad del producto final y su adecuación para diversos usos industriales y comerciales.

- Grados API: Este término se usa en la industria petrolera para determinar la gravedad específica del petróleo en comparación con la del agua, mediante métodos de cálculo estandarizados. Un petróleo con menor grado API indica una menor densidad y mayor concentración de hidrocarburos que pueden ser convertidos en productos refinados como la gasolina. Esta medida es esencial para estimar cuántos barriles de crudo se pueden obtener de una tonelada métrica de petróleo, basándose en su densidad volumétrica.
- Viscosidad absoluta: La viscosidad absoluta describe la resistencia de un líquido a fluir a una velocidad constante en una superficie determinada. Es una medida fundamental para evaluar la capacidad de flujo de un líquido, sin tener en cuenta la influencia de la densidad del mismo.
- Viscosidad cinemática: Es la relación entre la viscosidad absoluta de una muestra y su densidad. Proporciona información sobre la resistencia al flujo de un líquido bajo la influencia de la gravedad. Se expresa en metros cuadrados por segundo (m^2/s) en el Sistema Internacional (SI).
- Viscosidad dinámica (coeficiente de): Se refiere a la relación entre el esfuerzo cortante aplicado a un líquido y la velocidad de corte resultante. Esta medida indica la resistencia al flujo de un líquido y se expresa en pascal por segundo (Pa·s) según la norma COVENIN 2052.
- Contenido de humedad: Esta propiedad es de suma importancia para determinar la calidad de los combustibles sólidos, ya que indica la cantidad de agua presente en el material. El contenido de humedad influye directamente en la eficiencia y

rendimiento durante la combustión, afectando la liberación de energía y la estabilidad del proceso.

- Punto de congelación: Este parámetro se define como la temperatura a la cual una sustancia pierde completamente su capacidad para formar cristales de hielo cuando se expone a condiciones de calor. Es un indicador crítico para evaluar la susceptibilidad del combustible a congelarse bajo condiciones frías, lo que puede afectar su almacenamiento y utilización en climas extremadamente fríos.
- Punto de inflamación (Flash Point): Es la temperatura más baja a la cual los vapores desprendidos de un combustible pueden encenderse momentáneamente en presencia de una fuente de ignición externa. Este parámetro es esencial para determinar la seguridad en el manejo, almacenamiento y transporte de combustibles, garantizando condiciones seguras para evitar riesgos de incendios o explosiones.
- Punto de inflamación (Flash Point): Es la temperatura más baja a la cual los vapores desprendidos de un combustible pueden encenderse momentáneamente en presencia de una fuente de ignición externa. Este parámetro es esencial para determinar la seguridad en el manejo, almacenamiento y transporte de combustibles, garantizando condiciones seguras para evitar riesgos de incendios o explosiones.
- Número de octano/cetano: También conocido como RON (Research Octane Number), este parámetro está relacionado con la resistencia del combustible a la detonación en un motor de combustión interna. Un alto número de octano indica una mayor resistencia a la detonación, lo que es crucial para garantizar una combustión eficiente y controlada en los motores. Por otro lado, el número de cetano se refiere a la facilidad de encendido del combustible diesel, influyendo en la eficiencia y el rendimiento del motor.

- **Calor específico:** Este término se refiere a la cantidad de calor que se requiere para elevar la temperatura de una unidad de masa de un material en un grado Celsius. Varía según el tipo y la composición del combustible, siendo más alto en compuestos pesados y disminuyendo con el aumento de la densidad del crudo. El calor específico es crucial para entender cómo los diferentes combustibles responden al calor y para calcular la energía liberada durante su combustión, siendo fundamental en la industria automotriz y en las refinerías para optimizar procesos y mejorar la eficiencia energética. (Carranza & Marreros, 2020)

6.3. Definición de Términos

- **Aplicaciones del Combustible Líquido:** Las diversas formas en que el combustible líquido producido puede ser utilizado, como en generadores, hornos, bombas agrícolas y otras aplicaciones. (Munoz, 2012)
- **Economía Circular:** La consideración de cómo se pueden reciclar o reutilizar los residuos generados en el proceso para minimizar la generación de desechos y maximizar la eficiencia de los recursos. (UNESCO, 2023)
- **Eficiencia del Proceso:** La medida de cuánto combustible líquido se puede obtener con éxito a partir de los materiales plásticos y la calidad del producto final. (UNESCO, 2023)
- **Normativas y Regulaciones:** Las leyes y regulaciones locales y nacionales que rigen la producción de combustible líquido mediante procesos de pirólisis, asegurando el cumplimiento de estándares ambientales y de seguridad. Ministerio de Energía y Minas, (2022)
- **Polietileno de Alta Densidad:** Un tipo de plástico con una densidad superior al polietileno convencional, que se utiliza como una de las principales materias primas en el proceso de pirólisis para la obtención de combustible líquido. (Caceres, 2018)

- **Proceso de Pirólisis:** Es una técnica de descomposición térmica de materiales orgánicos en ausencia de oxígeno, que se utiliza en este contexto para convertir el polietileno de alta densidad y el tereftalato en combustible líquido. (Coronel, 2014)
- **Sostenibilidad Ambiental:** La consideración de los impactos ambientales del proceso de obtención de combustible líquido, incluyendo la gestión adecuada de los residuos y la minimización de la contaminación. (UNESCO, 2023)
- **Tecnología de Reactores:** Los equipos específicos utilizados en el proceso de pirólisis, que pueden ser de diferentes tipos, como reactores Batch, continuos o semi-batch, y que tienen un impacto en la eficiencia del proceso. (Coronel, 2014)
- **Tereftalato:** Un polímero utilizado en la fabricación de envases plásticos y botellas, que también se emplea en la producción de combustible líquido a través de la pirólisis. (Caceres, 2018)

6.4. Marco Normativo

- ✓ Ley General de Residuos Sólidos (Ley N° 27314), que establece las bases para la gestión integral de residuos sólidos, incluyendo el tratamiento de plásticos.
- ✓ La Ley Marco del Sistema Nacional de Gestión Ambiental (Ley N° 28245) proporciona los principios y normas generales para la protección ambiental en el país, regulando actividades industriales como las plantas de pirólisis.
- ✓ la Ley de Promoción del Reciclaje (Ley N° 29419) promueve prácticas de reciclaje y reutilización de materiales, lo cual puede favorecer iniciativas de economía circular con respecto al tratamiento de residuos plásticos.
- ✓ Las Normas Técnicas Peruanas (NTP) son estándares técnicos aplicables que podrían especificar la calidad requerida para los combustibles líquidos obtenidos mediante pirólisis, asegurando su conformidad con estándares nacionales e internacionales.

- ✓ Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional (Decreto Supremo N° 009-2005-TR) regula las condiciones de seguridad y salud en el trabajo, protegiendo a los trabajadores en instalaciones industriales como las plantas de pirólisis.
- ✓ ley modifica el Decreto Legislativo 1278, que establece la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, introduciendo la idea de industrializar el proceso de reciclaje como parte de su desarrollo. Esto significa fomentar la transformación de los residuos reciclables en productos industriales, en lugar de limitarse solo a la recolección y tratamiento básico de residuos. El objetivo es agregar valor a los residuos, promoviendo así una economía circular y reduciendo el impacto ambiental asociado con la gestión de residuos.
- ✓ Ley N° 30884, en Perú regula el uso de plásticos de un solo uso y envases descartables, con el propósito de reducir el impacto ambiental asociado a estos materiales. Su objetivo principal es promover prácticas más sostenibles y el adecuado manejo de residuos, mediante la prohibición o restricción de ciertos tipos de plásticos, la incentivación de materiales biodegradables y compostables, y la responsabilidad extendida del productor en la gestión de residuos plásticos. Además, busca fomentar la educación ambiental y la investigación para desarrollar alternativas eco amigables en la fabricación y uso de envases y recipientes.

IV. Metodología

4.1. Tipo y nivel de investigación

4.1.1. Tipo de Investigación

La investigación es de tipo experimental. Este enfoque nos permitió manipular las variables independientes, que en este caso son los materiales PEAD y PET, para observar y medir sus efectos sobre la variable dependiente, es decir, la cantidad y calidad del combustible obtenido. De acuerdo a Ríos (2017) Hernández y Mendoza (2018) la investigación experimental se concentra en abordar problemas específicos o resolver preguntas prácticas en el mundo real, como es el caso de la “Obtención de Combustible Líquido con Polietileno de Alta Densidad y Tereftalato Mediante procesos de Pirolisis en el Distrito de Umachiri – Puno, 2024”. Sus características incluyen la relevancia práctica al centrarse en la obtención de combustible a partir de plásticos reciclados en un lugar específico, la resolución de problemas mediante el estudio y la aplicación de técnicas de pirólisis, la aplicación directa de los resultados en la producción de combustible con impacto real, como la generación de energía o la gestión de residuos, y la colaboración con la industria o la comunidad local para abordar eficazmente los problemas identificados.

4.1.2. Nivel de Investigación

El nivel de investigación es explicativo, ya que no solo se describe el proceso de descubrimiento de combustible, sino que también se busca explicar las relaciones de causa efecto entre las variables manipuladas y los resultados obtenidos. Según Ríos (2017) una investigación explicativa, consiste en entender el objetivo y comprender las relaciones de causa y efecto entre las variables involucradas en el proceso de obtención de combustible líquido a partir de polietileno de alta densidad y tereftalato mediante procesos de pirólisis. Esto implica identificar las razones detrás de los resultados observados y explicar por qué ocurren ciertos fenómenos. Para lograr esto, la investigación implicó la manipulación controlada de variables (por ejemplo, la temperatura, el tiempo de residencia, la cantidad de materiales) para investigar cómo estos factores influyen en la eficiencia del proceso y la calidad del combustible líquido producido. Luego, se realizarían análisis estadísticos y modelos para comprender y explicar las relaciones observadas.

4.2. Ámbito temporal y espacial

La investigación se lleva a cabo en un contexto específico tanto temporal como espacialmente.

Temporalmente, el estudio se realizó en el año 2024. Espacialmente se enfoca en la obtención de combustible líquido a partir de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) y Tereftalato de Polietileno (PET) que provienen del Distrito de Umachiri, en la región de Puno. Sin embargo, es importante resaltar que el proceso de pirólisis, mediante el cual se convierten PEAD y PET en combustible, se realiza en la región del Cusco.

Espacialmente, el estudio se realizó en:

- Región : Puno
- Provincia : Melgar

- Distrito : Umachiri

Ubicación Geográfica del Distrito de Umachiri

Coordenadas geográficas

→ Latitud: 14° 51' 12" Sur

→ Longitud: 70° 45' 12" Oeste

Figura 2

Ubicación geográfica del distrito de Umachiri



Fuente: Google Earth (2024)

4.3. Población, muestra y muestreo

4.3.1. Población

Todos los PET y PEAD del distrito de Umachiri – Puno. Según Lima K. (2020), La composición física de los residuos sólidos urbanos en la ciudad de Umachiri es la siguiente:

Figura 3*Análisis de la composición física de residuos sólidos - Umachiri*

Características de los residuos sólidos urbanos	Peso (%)
Residuos sólidos aprovechables	52
Residuos sólidos orgánicos compostaje	32.06
Residuos orgánicos	31.6
Madera	0.5
Residuos sólidos reciclables	19.9
Papel	1.8
Cartón	0.8
Vidrio	1.2
Plástico:	15.2
PET (tereftalato de polietileno)	5
PEAD (HDPE) (polietileno de alta densidad)	1.4
PVC (cloruro de polivinilo)	0.8
PEBD o LDPE (polietileno de baja densidad)	2.5
PP (polipropileno)	3.9
PS (poliestireno)	0.7
Aluminio	0.9
Residuos sólidos no aprovechables	48
Telas y jebe	0.5
Materia inerte (tierra)	17.3
Pilas y batería	1.7
Hojalata	2.4
Tetra pack	0.2
Pañales y toallas higiénicas	0.6
Papel higiénico	3.5
Ceniza	20.5
Otros (Cuero, Porcelana, Tecnopor)	1.4
Total	100

Fuente: (Lima, 2020)

La Figura 3 presenta la composición física de los residuos sólidos urbanos en Umachiri al 2019, muestra los diferentes tipos de residuos y su peso porcentual en el total de residuos. A continuación, se interpretan las cantidades de PET y PEAD:

- a. PET (Tereftalato de polietileno):** Representa el 10,0% del total de residuos sólidos urbanos. Esto indica que 10 de cada 100 unidades de peso (por ejemplo, kilogramos) de residuos sólidos urbanos en Umachiri corresponden a PET.

b. PEAD (Polietileno de Alta Densidad):

Representa el 1,4% del total de residuos sólidos urbanos. Esto supone que 1,4 de cada 100 unidades de peso de residuos sólidos urbanos corresponden a PEAD. Por lo tanto, estos porcentajes indican la proporción de materia prima (PET y PEAD) disponible en los residuos sólidos municipales de Umachiri para ser procesados mediante pirólisis. El PET es mucho más abundante que el PEAD, lo que puede influir en el volumen de combustible que se puede obtener y en el diseño del proceso de pirólisis.

4.3.2. Muestra

Según Hernández & Mendoza (2020), definen la muestra como "un subconjunto de elementos de la población que se seleccionan para participar en un estudio, de modo que las conclusiones obtenidas del análisis de la muestra puedan generalizarse a la población total. La muestra debe ser representativa para que los resultados "son válidos y aplicables a la población de interés."

Tabla 3

Tabla de muestra (PET Y PEAD)

Material	Peso (g)
PET	5506
PEAD	5417
Total	10.923

4.3.3. Muestreo

Muestreo: No probabilístico por conveniencia

Hernández (2021), define el muestreo por conveniencia como "un método en el que se seleccionan los elementos más cercanos y disponibles en el entorno del investigador. Es el método más fácil y rápido de implementar, pero tiene la limitación de no proporcionar una muestra representativa de la población".

4.4. Técnicas

4.4.1. Observación Directa e Indirecta

Observación Directa: Este enfoque implica la presencia física de los investigadores en el lugar donde se realiza el proceso de pirólisis en Umachiri - Puno. Los investigadores observan directamente las operaciones, registran las condiciones de trabajo, toman notas sobre el equipo utilizado y documentan el flujo de trabajo. También registran los datos sobre las variables operacionales, como la temperatura del horno de pirólisis, el tiempo de residencia, la cantidad de material de entrada (PEAD y PET) y la producción de combustible líquido. La observación directa proporcionaría una visión detallada y en tiempo real del proceso.

4.5. Instrumentos

Se utilizó una ficha de observación para la recolección de datos, a continuación de muestra el modelo:

4.5.1. Ficha de Observación

Tabla 4

Ficha de Observación

FICHA DE OBSERVACION	
CATEGORIA	DETALLES
Datos Generales	
Periodo de Evaluación	
Hora de inicio	
Hora de Finalización	
Ubicación	
Nombre de los Observadores	
Objetivo de la observación	
Descripción de la Actividad o Situación	
Contexto General	
Descripción del Entorno	
Actores Involucrados	
Aspectos a Observar	
Categorías o Variables a Observar	1. Temperatura del reactor
	2. Tiempo de reacción
	3. Cantidad de combustible líquido producido
	4. Comportamiento del material durante el proceso
Registro de Datos	
Observaciones Detalladas	
Análisis Preliminar	
Interpretación Inicial de las Observaciones	
Conclusiones Provisionales	
Resumen de Observaciones	
Relación con el Objetivo del Estudio	
Comentarios Adicionales	
Observaciones sobre el Proceso de Observación	

Tabla 5*Ficha de recolección de datos*

Material Procesado	Día	Fecha	Temperatura del Reactor (°C)		Tiempo de Reacción (min)	Cantidad de Combustible Producido (ml)	Comportamiento del Material Durante el Proceso
			T _i (°C)	T _f (°C)			
PEAD	1						<i>Prueba piloto</i>
PET	2						<i>Prueba piloto</i>
PEAD	3						<i>Prueba piloto</i>
PET	4						<i>Prueba piloto</i>
PEAD	5						<i>Prueba piloto</i>
PEAD	6						
PET	7						
PEAD	8						
PET	9						
PEAD	10						
PET	11						
PEAD	12						
PET	13						
PEAD	14						
PET	15						

Instrucciones para llenar el formulario:

- Temperatura inicial (T_i): Se registrará la temperatura del reactor inmediatamente antes de iniciar el proceso de pirólisis.
- Temperatura final (T_f): Se registrará la temperatura del reactor al final del proceso de pirólisis.
- Tiempo de reacción (T_r): Minimiza el tiempo total desde el inicio del calentamiento del material hasta el final de la reacción.
- Cantidad de combustible producido (V): Indica el volumen de combustible líquido obtenido al final del proceso.
- Comportamiento del material: Describa cualquier cambio notable en el material durante la pirólisis, como cambios de color, formación de residuos, comportamiento durante la fusión.

Esta hoja de observación estructurada permitirá registrar y analizar sistemáticamente los datos recopilados durante las diferentes pruebas de pirólisis del PET y PEAD.

Observación Indirecta: Esta técnica puede implicar la revisión de registros y documentos relacionados con el proceso de pirólisis, como registros de temperatura, tiempos de residencia, especificaciones de los materiales utilizados, resultados de análisis químicos y registros de producción de combustible líquido. También podría incluir entrevistas con operadores y trabajadores involucrados en el proceso para obtener información sobre las prácticas y la operación del equipo. La observación indirecta complementaría la información obtenida mediante la observación directa.

4.6. Procedimientos

4.6.1. Preparación del Material Antes de la Pirólisis

a. Recolección y selección de materiales:

- Se seleccionaron muestras de PET (Tereftalato de Polietileno) y PEAD (Polietileno de Alta densidad) obtenidas en el distrito de Umachiri, Puno.
- Se verificó que el PET y PEAD estuviera libre de contaminantes, como restos de comida o etiquetas, para evitar interferencias en el proceso de pirólisis.

b. Limpieza de materiales

- Las muestras de PET y PEAD se lavaron con agua a temperatura ambiente, eliminando cualquier residuo superficial.
- Luego, las muestras se secaron al aire libre para eliminar la humedad restante, ya que la presencia de agua puede afectar la eficiencia del proceso de pirólisis.

c. Trituración

- Una vez secas, las muestras de PET y PEAD se trituraron manualmente en fracciones de 1cm a 3 cm utilizando tijeras.

- El tamaño de fracciones se mantuvo heterogénea, con un diámetro promedio de 1 a 3 cm, para garantizar un procesamiento más homogéneo durante el pirólisis.

d. Pesaje de materiales

- Las partículas de PET y PEAD trituradas se pesaron utilizando una balanza digital.
- El material se dividió en porciones de 1101.2 gramos en promedio para cada prueba de pirólisis, asegurando la coherencia en las cantidades utilizadas.

e. Almacenamiento de materiales

- Las muestras preparadas se almacenaron en recipientes secos para evitar la reabsorción de humedad o contaminación antes de ser sometidas al proceso de pirólisis.

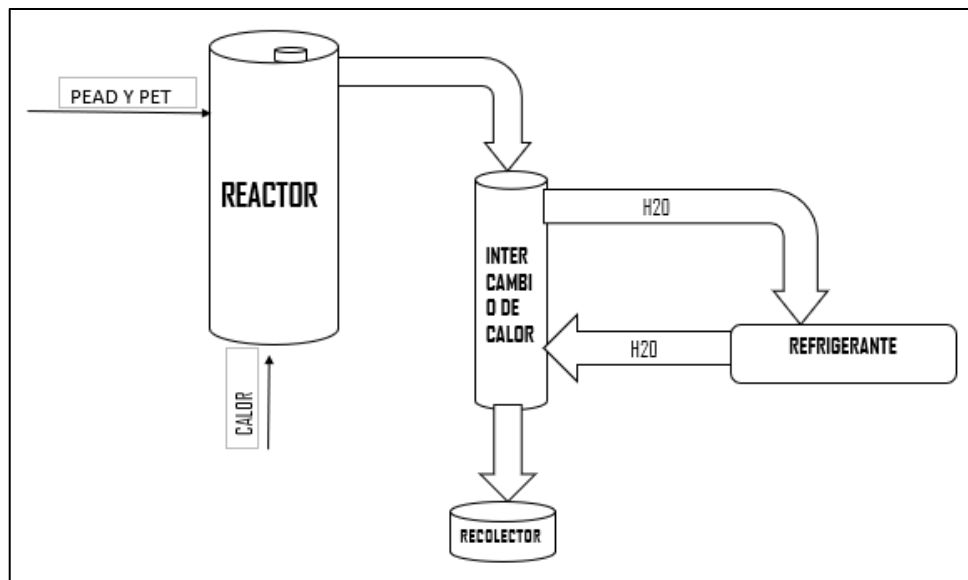
f. Inspección final

- Antes de cada prueba, se realizó una inspección visual del material para confirmar que no había partículas extrañas ni deterioro en las muestras.

4.6.2. Procedimiento de la Pirolisis del Material (PET- PEAD)

Figura 4

Proceso de Pirolisis



a. Preparación del reactor

- Inspección de reactores: Antes de iniciar el proceso se realizó una inspección completa del reactor de pirólisis para asegurar que se encuentra en óptimas condiciones de funcionamiento.
- Se comprobó el correcto funcionamiento del sistema de control de temperatura, las uniones de conexión y la limpieza del interior del reactor.

b. Carga del material

- Colocación del material en el reactor: Se introdujeron en el reactor las muestras de PET previamente preparadas y pesadas. Se realizó el mismo procedimiento para la pirolisis del PEAD.
- Se aseguró que el material se distribuyera uniformemente dentro del reactor para promover una descomposición homogénea durante la pirólisis.

c. Configuración de parámetros

- Establecimiento de la Temperatura Inicial (T_i): La temperatura inicial del reactor se fijó en 300°C para iniciar el proceso de pirólisis, dado que los antecedentes mencionados en el marco teórico sugerían trabajar a temperaturas superiores o iguales a 300°C. Sin embargo, al realizar las pruebas piloto comprobamos que al trabajar a temperaturas superiores a 200°C se obtenía como producto solo gases, es por ello que luego de las 5 pruebas piloto trabajamos en un rango de 160°C a 200°C.
- Control de temperatura final (T_f): En la primera prueba piloto la temperatura fue aumentando gradualmente hasta alcanzar la temperatura final deseada de 300-310°C, dependiendo de los parámetros de cada ensayo. Sin embargo, en las posteriores pruebas se fue reduciendo hasta llegar a 168°C como temperatura final.
- Tiempo de reacción: El tiempo de reacción se programó como punto de partida de 90 minutos, ajustándose según el comportamiento observado en cada prueba.

d. Ejecución de pirólisis

- Monitoreo de Procesos: Durante la pirólisis se controlaron continuamente variables clave como la temperatura del reactor y las posibles emisiones de gases.
- Se observó atentamente el comportamiento del PET y PEAD respectivamente, observándose cambios en la consistencia del material, emisión de gases o vapores.
- Recolección de combustible líquido: A medida que se producía combustible líquido, se canalizaba mediante un serpentín a un recipiente colector (matraz) a través de un sistema de condensación.

e. Enfriamiento y acabado

- Enfriamiento del reactor: Una vez completado el tiempo de reacción, se apagó el sistema de calentamiento y se enfrió el reactor de forma controlada.
- Se dejó que el material residual dentro del reactor se enfriara completamente antes de proceder con la apertura del reactor, sin embargo, cuando se trabajó a temperaturas superiores 200°C no se obtuvieron residuos y en cambio para el caso de temperaturas inferiores a 200°C se obtuvo como producto un 5% de residuos (carbón) aproximadamente.
- Extracción de producto: El combustible líquido producido fue retirado cuidadosamente del sistema de recolección y almacenado en botellas (rotulados) de Vidrio Ámbar o Borosilicato con tapa para su posterior análisis.

f. Limpieza y mantenimiento

- Limpieza de reactores: Después de cada prueba, el reactor se limpió para eliminar cualquier residuo de PET y PEAD u otros materiales que pudieran interferir con las pruebas posteriores.
 - Registro de datos: Se registraron todas las observaciones y resultados, incluida la cantidad de combustible líquido producido, el comportamiento del material durante el proceso y las anomalías detectadas, en la ficha de observación.

4.6.3. Evaluación de la muestra de combustible resultado de la pirólisis

a. Recolección de muestras

- Recuperación de combustible: Una vez finalizado el proceso de pirólisis, el combustible líquido producido se recogió en una botella de Vidrio Ámbar o Borosilicato con tapa hermética.

- Se aseguro la recolección de todo el combustible líquido producido en cada prueba para un análisis completo.
- Etiquetado: Cada muestra fue etiquetada con información relevante, como fecha de prueba, temperatura del reactor, tiempo de reacción y peso del material (PET y PEAD) utilizado.

b. Determinación del desempeño

- Medición de volumen: El volumen de combustible líquido producido en cada prueba se midió mediante una probeta graduada.
- Se registraron los volúmenes obtenidos y se calculó el rendimiento porcentual en relación al peso inicial de PET utilizado.
- Fórmula para el cálculo de rendimiento.

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{\text{Peso del hidrocarburo(g)}}{\text{Peso del plastico utilizado(g)}} \times 100$$

c. Caracterización fisicoquímica

- Análisis de densidad: La densidad del combustible líquido se determinó mediante un picnómetro. Este valor se comparó con los rangos típicos de combustibles líquidos convencionales. La densidad de la muestra se calculó utilizando la fórmula:

$$\text{Densidad } (D_{muestra}) = \frac{m_{muestra}}{v_{muestra}}$$

$$\text{Donde: } m_{muestra} = \text{masa de la muestra(g)}$$

$$v_{muestra} = \text{volumen de la muestra(ml)}$$

- Análisis de viscosidad: Se midió la viscosidad del combustible líquido a una temperatura controlada de 20°C. Posteriormente la viscosidad se registró y se comparó con la de otros

combustibles similares. Se determinó utilizando la fórmula de Stokes para una esfera (canica) en un fluido:

$$\eta = \frac{2r^2 g (P_e - P_f)}{9v_e}$$

Donde:

- r = radio de la esfera
- g = gravedad (9.8 m/s^2)
- P_e = densidad de la esfera (canica)
- P_f = densidad del fluido
- v_e = velocidad de la esfera

- Grados API: Los grados API (American Petroleum Institute Gravity) se determinó con la siguiente fórmula:

$$\text{API} = \frac{141.9}{GE(15C)} - 131.5$$

Donde:

- $GE(15^\circ\text{C})$ = gravedad específica o densidad relativa a 15°C

Para ello se utilizaron datos como la densidad:

$$D(15^\circ\text{C}) = D(t_e) + b * (t_e + 15^\circ\text{C})$$

$$GE = \frac{D(15^\circ\text{C})}{DW(15^\circ\text{C})}$$

- Punto de inflamabilidad: El punto de inflamación del combustible se determinó colocando un termómetro que este en contacto con la muestra y en la parte inferior se colocó una cocina eléctrica que permitió el calentamiento de la muestra, mientras tanto se colocó un mechero encendido a dos o tres cm de distancia de la muestra. Este valor se utilizó para evaluar la seguridad del combustible durante su manipulación y almacenamiento.

d. Evaluación Energética

- Calor Especifico (cal/g.°c): El calor especifico se calculó con la ecuación de equilibrio térmico:

$$Q_m = Q_\omega$$

$$m_\omega \cdot C_{e\omega} \cdot \Delta t = m_m \cdot C_{em} \cdot \Delta t$$

Despejando C_{em} :

Donde:

→ $m_\omega = \text{calor específico del agua (g)}$

→ $C_{e\omega} = \text{calor específico del agua } (\frac{\text{cal}}{\text{g}} \cdot ^\circ\text{c})$

→ $\Delta t_1 = \text{diferencia de temperatura del agua } (^\circ\text{c})$

→ $m_m = \text{masa de la muestra (g)}$

→ $\Delta t_2 = \text{diferencia de temperatura de la muestra } (^\circ\text{c})$

- Punto de inflamabilidad: El punto de inflamación del combustible se determinó usando un aparato de copa cerrada tal como el Cleveland Open Cup Tester. Este valor se utilizó para evaluar la seguridad del combustible durante su manipulación y almacenamiento.

4.7. Análisis de Datos

Se realizó un análisis estadístico para determinar las correlaciones entre las variables de los materiales (PET y PEAD) y la calidad del combustible líquido obtenido. Se utilizó software estadístico Minitab para realizar el análisis de regresión, análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de correlación. Se interpretó los resultados del análisis estadístico para identificar las condiciones óptimas del proceso de pirólisis que maximicen la calidad del combustible líquido obtenido.

4.8. Consideraciones éticas

En el desarrollo de “Obtención de Combustible Líquido con Polietileno de Alta Densidad y Tereftalato Mediante procesos de Pirólisis en el Distrito de Umachiri – Puno, 2024”, fue fundamental abordar las consideraciones éticas relacionadas con el proceso de investigación y desarrollo del proyecto, así como las implicaciones de la aplicación de la tecnología de pirólisis en la obtención de combustible a partir de PET y PEAD.

Respeto al Medio Ambiente: Se aseguró que los procesos de pirólisis y la obtención de combustible se realizaran de una manera que minimice el impacto negativo en el medio ambiente, cumpliendo con todas las normativas y regulaciones ambientales aplicables.

Salud y Seguridad: La salud y seguridad de los investigadores fue prioridad, asegurando que se implementen todas las medidas de seguridad necesarias para evitar accidentes y exposición a sustancias nocivas.

Transparencia: Se garantizó la transparencia en todas las etapas de la investigación, proporcionando información clara y precisa sobre los objetivos, metodología, resultados y posibles aplicaciones de la tecnología.

Uso Responsable de la Tecnología: La tecnología desarrollada fue utilizada de manera responsable y ética, evitando su uso para fines que puedan perjudicar a la sociedad o el medio ambiente.

Gestión de Residuos: Fue fundamental abordar de manera ética y responsable la gestión de los residuos generados durante el proceso de pirólisis, asegurando su adecuado tratamiento y disposición final.

En resumen, se ha abordado de manera responsable las implicaciones éticas relacionadas con el desarrollo y aplicación de la tecnología de pirólisis para “Obtención de Combustible Líquido con Polietileno de Alta Densidad y Tereftalato Mediante procesos de

Pirolisis en el Distrito de Umachiri – Puno, 2024”, con el objetivo de garantizar un impacto positivo en la sociedad y el medio ambiente.

V. Resultados y discusión

5.1. Resultados

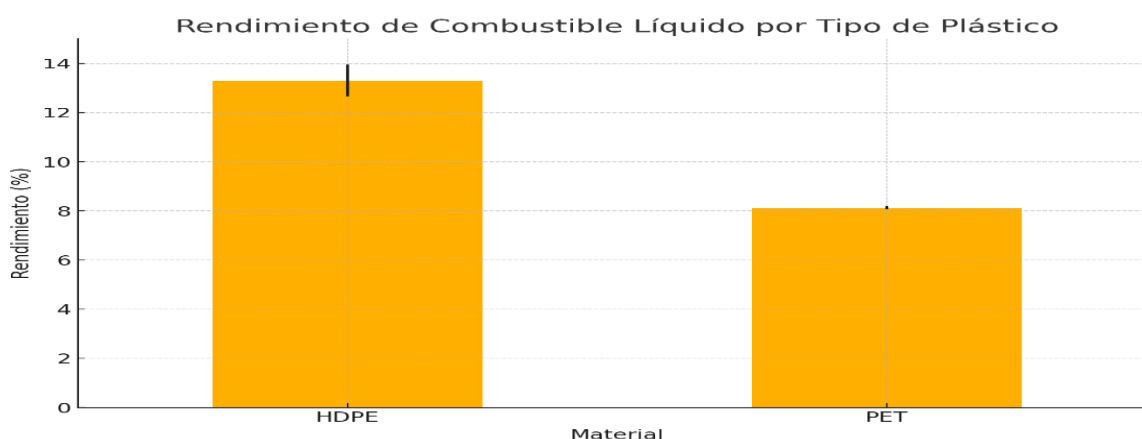
Tabla 6

Rendimiento de Combustible Líquido por Tipo de Plástico

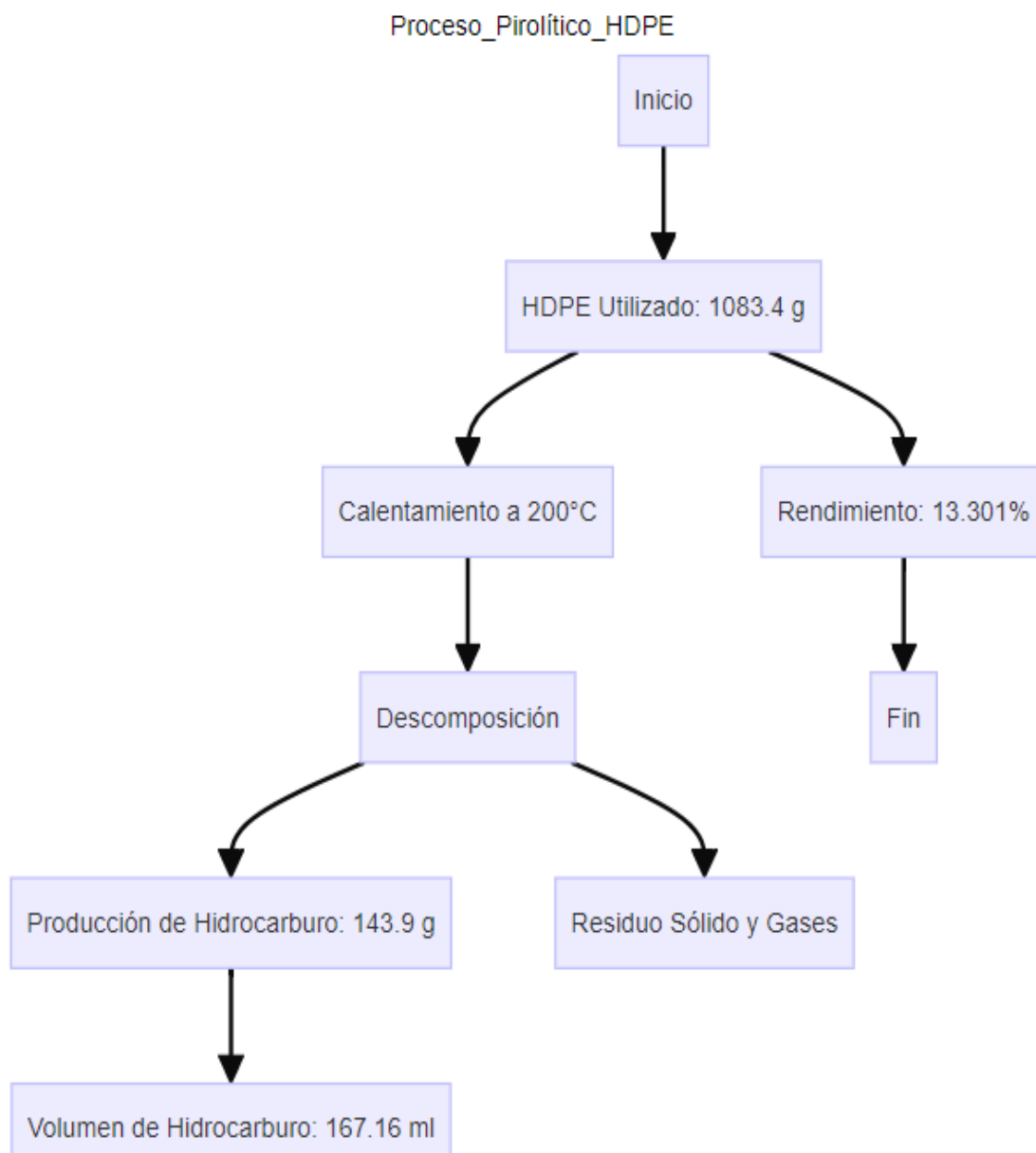
Material	Media Rendimiento (%)	Desv. Est.	Mínimo	Máximo
PEAD	13.301	0.642	12.613	14.351
PET	8.1166	0.0643	8.0412	8.1852

Figura 5

Rendimiento de Combustible Líquido por Tipo de Plástico



El PEAD muestra un rendimiento promedio significativamente mayor en la producción de combustible líquido a través del proceso de pirólisis en comparación con el PET. La menor desviación estándar del PET indica una mayor consistencia en los resultados experimentales, aunque su rendimiento es considerablemente menor que el del PEAD. Esto sugiere que el PEAD es más eficiente y consistente dado que en cada prueba el combustible obtenido del PEAD es superior en comparación al PET en la conversión a hidrocarburos líquidos, haciendo de él una mejor opción para este proceso en términos de rendimiento.

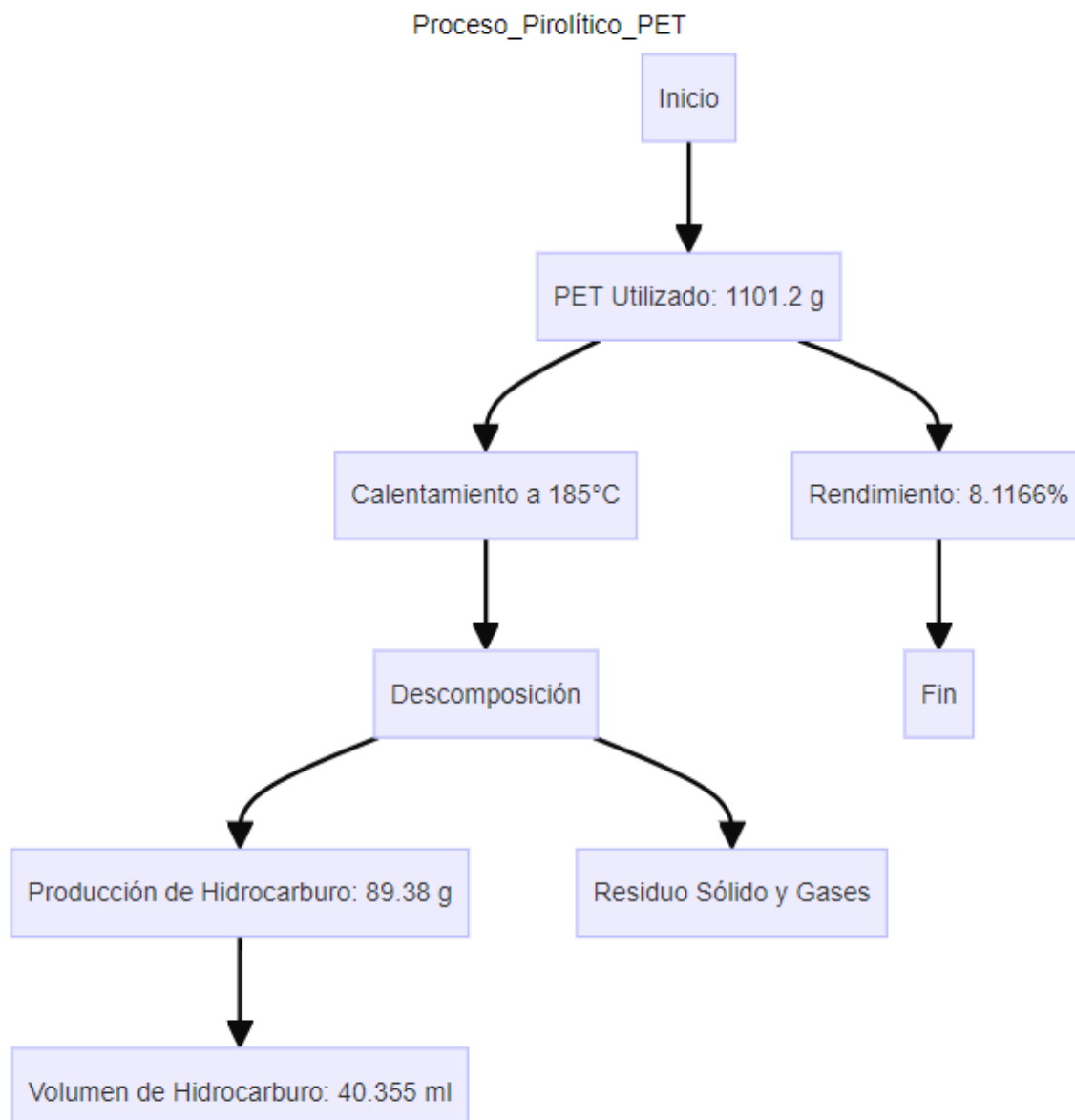
Figura 6*Proceso pirolítico del PET*

El proceso pirolítico del PEAD comenzó con la utilización de una cantidad específica en promedio de 1083.4 g de PEAD. Este material se calienta a una temperatura constante de 200°C promedio, identificada como óptima para este proceso. Durante el calentamiento, el PEAD se descompone produciendo hidrocarburos y otros subproductos. La descomposición resulta en la producción de 143.9 g de hidrocarburo, con un volumen total de 167.16 ml de hidrocarburo generado. Además del hidrocarburo, se producen gases. El rendimiento del

proceso, basado en la cantidad de hidrocarburo producido en comparación con la cantidad de PEAD utilizado, es del 13.301%. Finalmente, el proceso concluye con la obtención de estos productos y subproductos, subrayando la eficiencia del PEAD en la producción de hidrocarburos bajo estas condiciones.

Figura 7

Proceso pirolítico del PEAD



El proceso pirolítico del PET se inicia con la preparación de 1101.2 g de PET. Este material se somete a un calentamiento a 185°C, determinada como la temperatura óptima

para su procesamiento. Bajo estas condiciones, el PET se descompone produciendo hidrocarburos y otros subproductos. La descomposición del PET genera 89.38 g de hidrocarburo, con un volumen total de 40.355 ml de hidrocarburo producido. Similar al proceso del PEAD, también se generan residuos sólidos y gases durante la descomposición del PET. El rendimiento del proceso, calculado a partir de la relación entre el hidrocarburo producido y la cantidad de PET utilizado, es del 8.1166%. El proceso concluye con la obtención de estos productos y subproductos, destacando las diferencias en eficiencia y rendimiento comparado con el PEAD.

Tabla 7

Características de Combustibles Comerciales (Información Teórica)

Propiedad	Gasolina	Diésel	Queroseno
Densidad (g/ml)	0.71 - 0.77	0.82 - 0.86	0.78 - 0.82
Viscosidad (Kg/m·s)	0.004 - 0.005	0.0025 - 0.0045	0.00164 - 0.00214
Gravedad API	55 - 60	30 - 40	40 - 50
Punto de Inflamación (°C)	-40 a -45	52 - 96	38 - 72
Calor Específico (cal/g·°C)	0.50 - 0.60	0.45 - 0.55	0.47 - 0.55

Los combustibles obtenidos mediante pirolisis de PEAD y PET presentan diferencias notables en sus características fisicoquímicas en comparación con los combustibles comerciales como gasolina, diésel y queroseno. La densidad del combustible derivado de PEAD (0.8676 g/ml) se asemeja al diésel (0.82 - 0.86 g/ml), mientras que la densidad del combustible derivado de PET (0.7751 g/ml) se compara con la del queroseno (0.78 - 0.82 g/ml). Sin embargo, ambos combustibles obtenidos tienen una viscosidad significativamente mayor que la de los combustibles comerciales, lo cual podría requerir ajustes para su uso. La gravedad API del combustible de PEAD es menor que la de los combustibles comerciales, indicativo de mayor densidad, mientras que la del PET está en el rango del queroseno. El

punto de inflamación del PEAD (68.8°C) y PET (79.2°C) se encuentran dentro de los rangos del diésel y queroseno respectivamente, sugiriendo un comportamiento similar en términos de seguridad. En cuanto al calor específico, ambos combustibles se encuentran dentro de los rangos de diésel y gasolina, lo que indica propiedades térmicas adecuadas. Estos resultados sugieren que, aunque los combustibles obtenidos de PEAD y PET podrían ser alternativas viables, especialmente para diésel y queroseno, requieren modificaciones adicionales debido a su alta viscosidad.

Tabla 8

Tabla de Características Fisicoquímicas del Combustible Obtenido

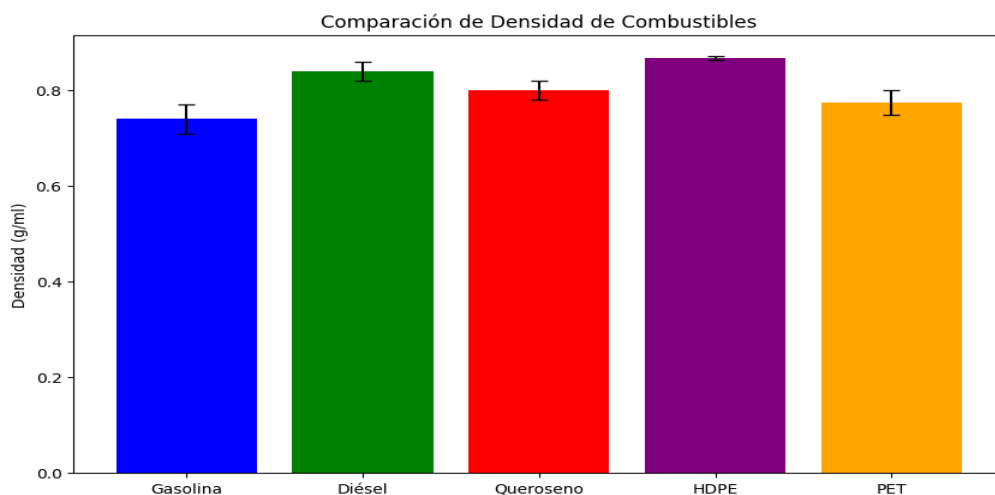
Propiedad	PEAD	PET
Densidad (g/ml)	0.86758	0.7751
Viscosidad (Kg/m·s)	0.902	0.0381
Gravedad API	25.7991	42.4932
Punto de Inflamación (°C)	68.8	79.2
Calor Específico (cal/g·°C)	0.50324	0.59177

Al comparar las características fisicoquímicas de los combustibles obtenidos de PEAD y PET (ver Tabla 8), se observa que el combustible derivado de PEAD tiene una densidad mayor (0.86758 g/ml) en comparación con el PET (0.7751 g/ml), lo cual lo hace más comparable al diésel comercial. Sin embargo, la viscosidad del combustible de PEAD (0.902 Kg/m·s) es extremadamente alta en comparación con cualquier combustible comercial, lo que indica que este combustible sería más difícil de manejar y podría requerir procesamiento adicional para su uso práctico. Por otro lado, la viscosidad del combustible de PET (0.0381 Kg/m·s) es mucho más baja, pero aún superior a la de la gasolina y el queroseno comerciales. En términos de gravedad API, el combustible de PEAD tiene una menor gravedad API (25.7991), indicativa de una mayor densidad relativa, mientras que el combustible de PET (42.4932) se encuentra en un rango medio, similar al queroseno. Los

puntos de inflamación de ambos combustibles obtenidos (PEAD: 68.8°C, PET: 79.2°C) son adecuados y se alinean con los valores esperados para diésel y queroseno, respectivamente. Finalmente, el calor específico del PEAD (0.50324 cal/g·°C) y del PET (0.59177 cal/g·°C) sugiere que ambos combustibles podrían proporcionar una eficiencia energética comparable a la de los combustibles comerciales, con el PET presentando un valor ligeramente superior, similar al rango de la gasolina. En resumen, aunque ambos combustibles derivados de PEAD y PET tienen propiedades que los hacen potencialmente utilizables, sus viscosidades presentan desafíos significativos que deben ser abordados antes de su implementación práctica.

Tabla 9*Comparativa de densidades del PEAD y PET*

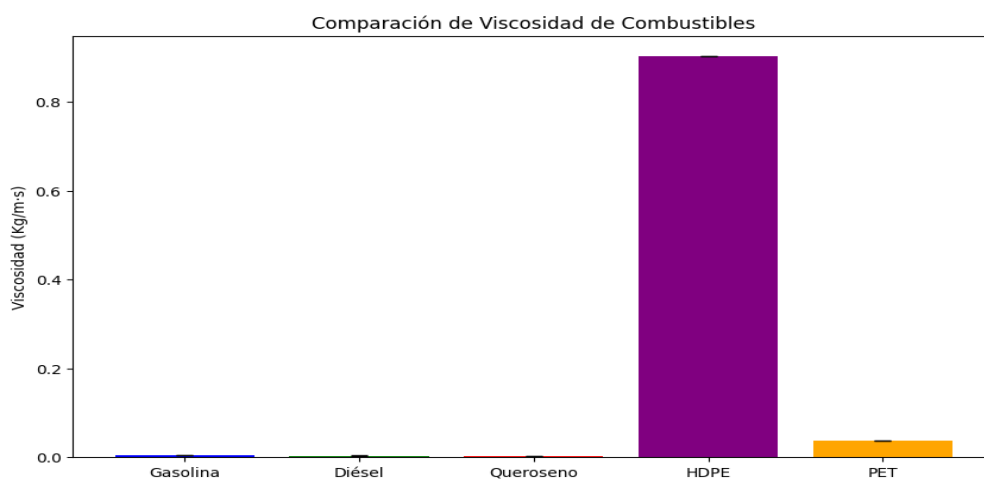
Propiedad	Gasolina	Diésel	Queroseno	PEAD	PET
Densidad (g/ml)	0.71 - 0.77	0.82 - 0.86	0.78 - 0.82	0.86758	0.7751

Figura 8*Comparativa de Densidad*

La densidad del combustible derivado de PEAD (0.86758 g/ml) es mayor que la del combustible comercial típico, siendo más cercana a la densidad del diésel (0.82 - 0.86 g/ml). Esto indica que el combustible de PEAD podría tener propiedades similares al diésel en términos de eficiencia energética y almacenamiento. Por otro lado, la densidad del combustible derivado de PET (0.7751 g/ml) se encuentra dentro del rango de densidad del queroseno (0.78 - 0.82 g/ml), sugiriendo que este combustible podría tener aplicaciones similares al queroseno, aunque es menos denso que el diésel y más denso que la gasolina.

Tabla 10*Comparativa de Viscosidad del PEAD y PET*

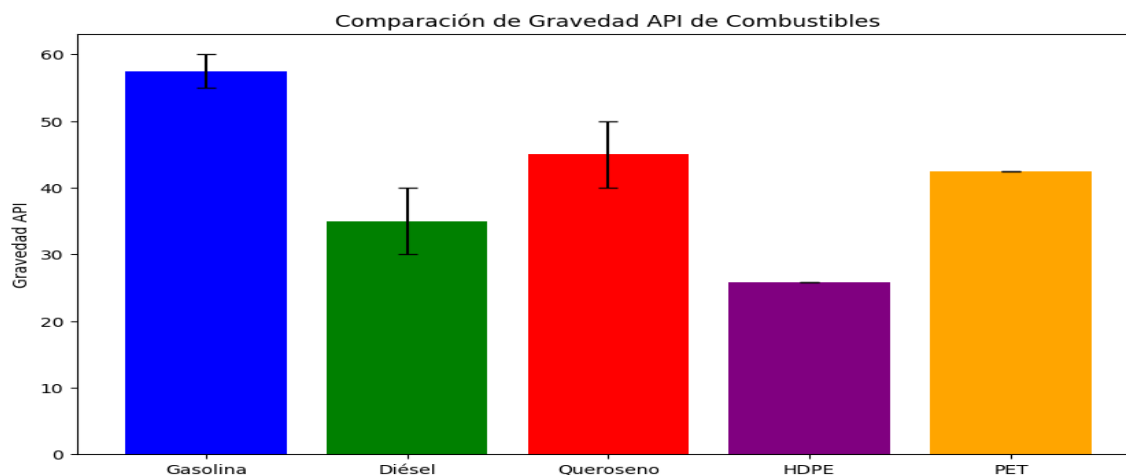
Propiedad	Gasolina	Diésel	Queroseno	PEAD	PET
Viscosidad (Kg/m·s)	0.004 - 0.005	0.0025 - 0.0045	0.00164 - 0.00214	0.902	0.0381

Figura 9*Comparativa de Viscosidad*

La viscosidad del combustible derivado de PEAD (0.902 Kg/m·s) es significativamente más alta que la de los combustibles comerciales (0.00164 - 0.005 Kg/m·s), lo que implica que el combustible de PEAD tendría una resistencia mucho mayor al flujo, presentando desafíos para su uso directo en aplicaciones que requieren combustibles líquidos de baja viscosidad. La viscosidad del combustible de PET (0.0381 Kg/m·s) también es considerablemente más alta que la de los combustibles comerciales, aunque mucho menor que la del PEAD. Esto sugiere que, aunque el combustible de PET es más fácil de manejar que el de PEAD, aún puede requerir procesamiento adicional para aplicaciones prácticas.

Tabla 11*Comparativa de Gravedad API del PEAD y PET*

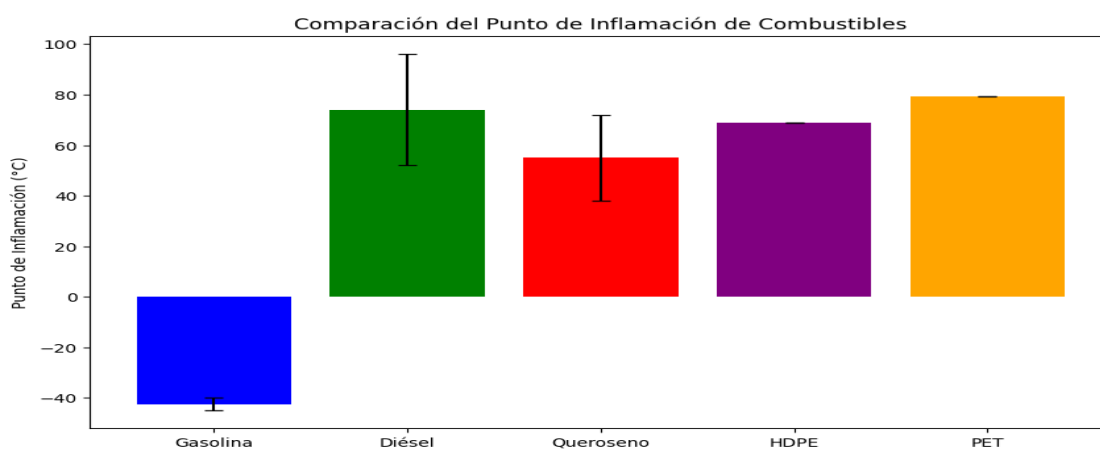
Propiedad	Gasolina	Diésel	Queroseno	PEAD	PET
Gravedad API	55 - 60	30 - 40	40 - 50	25.7991	42.4932

Figura 10*Comparativa de Gravedad API*

La gravedad API del combustible derivado de PEAD (25.7991) es considerablemente menor que la de los combustibles comerciales (30 - 60), indicando una mayor densidad relativa. Esto implica que el combustible de PEAD es más denso y menos volátil, lo que puede afectar su rendimiento en motores diseñados para combustibles más ligeros. Por el contrario, la gravedad API del combustible derivado de PET (42.4932) se encuentra en un rango medio, comparable a la del queroseno (40 - 50), lo que sugiere que podría ser utilizado en aplicaciones similares a las del queroseno.

Tabla 12*Comparativa del Punto de Inflamación del PEAD y PET*

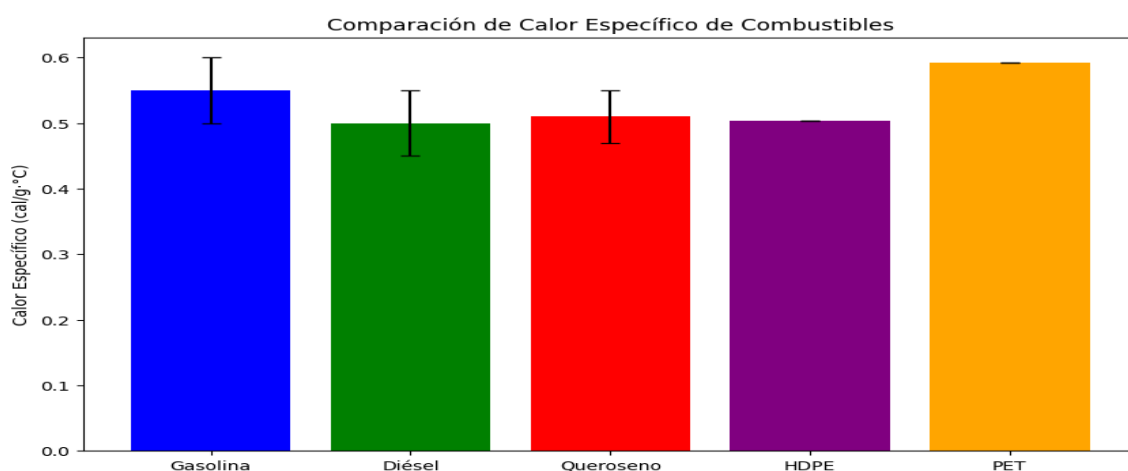
Propiedad	Gasolina	Diésel	Queroseno	PEAD	PET
Punto de Inflamación (°C)	-40 a -45	52 - 96	38 - 72	68.8	79.2

Figura 11*Comparativa del Punto de Inflamación*

El punto de inflamación del combustible derivado de PEAD (68.8°C) se encuentra dentro del rango del diésel (52 - 96°C) y del queroseno (38 - 72°C), lo que indica que tiene un nivel de seguridad adecuado para su almacenamiento y manejo, similar al diésel. El punto de inflamación del combustible derivado de PET (79.2°C) es superior, lo que sugiere un mayor nivel de seguridad y menor riesgo de inflamación accidental, alineándose más con los combustibles que requieren alta seguridad en su manipulación.

Tabla 13*Comparativa del Calor Específico del PEAD y PET*

Propiedad	Gasolina	Diésel	Queroseno	PEAD	PET
Calor Específico (cal/g·°C)	0.50 - 0.60	0.45 - 0.55	0.47 - 0.55	0.50324	0.59177

Figura 12*Comparativa del Calor Específico*

El calor específico del combustible derivado de PEAD (0.50324 cal/g·°C) se encuentra dentro del rango de los combustibles comerciales (0.45 - 0.60 cal/g·°C), similar al diésel, lo que indica que su eficiencia energética es comparable. El combustible derivado de PET (0.59177 cal/g·°C) tiene un calor específico superior, similar al de la gasolina, sugiriendo que podría ser más eficiente en términos de energía liberada por unidad de masa. Esto podría hacer que el combustible de PET sea una opción viable para aplicaciones donde se requiere alta eficiencia energética.

Tabla 14*Estadísticas descriptivas de variables del proceso de pirólisis para PEAD y PET*

Variable	Material	Media	Desv.Est.	Mínimo	Máximo
Peso Utilizado (g)	PEAD	1083.4	41.9	1009	1110
	PET	1101.2	5.54	1095	1110
Peso Hidrocarburo (g)	PEAD	143.9	2.33	140	146
	PET	89.38	0.89	88.453	90.783
Volumen Hidrocarburo (ml)	PEAD	167.16	2.7	162.63	169.6
	PET	40.355	0.949	39.379	41.819
Rendimiento (%)	PEAD	13.301	0.642	12.613	14.351
	PET	8.1166	0.0643	8.0412	8.1852

En la Tabla 14, se presentan las estadísticas descriptivas de las variables clave involucradas en el proceso de pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) y Tereftalato de Polietileno (PET). Peso Utilizado (g): PEAD presenta una media de 1083.4 g con una desviación estándar de 41.9 g, mientras que PET tiene una media ligeramente superior de 1101.2 g y una menor variabilidad con una desviación estándar de 5.54 g. Esto indica que el PET se utilizó en cantidades más consistentes en los experimentos comparados con el PEAD. Peso del Hidrocarburo (g): El PEAD produjo un mayor peso de hidrocarburo con una media de 143.9 g y una desviación estándar de 2.33 g, en comparación con el PET, que tuvo una media de 89.38 g y una desviación estándar de 0.89 g. Esto sugiere una mayor eficiencia en la producción de hidrocarburos a partir de PEAD. Volumen del Hidrocarburo (ml): Similarmente, el PEAD produjo un mayor volumen de hidrocarburo, con una media de 167.16 ml y una desviación estándar de 2.7 ml, en contraste con el PET, que produjo un volumen promedio de 40.355 ml con una desviación estándar de 0.949 ml. Rendimiento (%): El rendimiento del PEAD es significativamente mayor, con una media del 13.301% y una desviación estándar de 0.642%, comparado con el rendimiento del PET, que tiene una media

del 8.1166% y una desviación estándar de 0.0643%. Este resultado demuestra que el PEAD es más eficiente en la conversión a hidrocarburo mediante pirólisis que el PET.

Tabla 15

Estadísticas descriptivas de la densidad y viscosidad del PEAD y PET

Variable	Material	Media	Desv.Est.	Mínimo	Máximo
Densidad (g/ml)	PEAD	0.86758	0.00339	0.86286	0.8709
	PET	0.7751	0.0261	0.7429	0.7989
Viscosidad (Kg/m·s)	PEAD	0.902	0	0.902	0.902
	PET	0.0381	0	0.0381	0.0381

En la Tabla 15 se presentan las estadísticas descriptivas de la densidad y viscosidad del hidrocarburo producido a partir de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) y Tereftalato de Polietileno (PET). Los resultados indican que la densidad media del hidrocarburo derivado de PEAD es significativamente mayor (0.86758 g/ml) con una baja variabilidad (desviación estándar de 0.00339 g/ml) comparado con la densidad media del hidrocarburo derivado de PET (0.7751 g/ml) que muestra una mayor variabilidad (desviación estándar de 0.0261 g/ml). Este hallazgo sugiere una mayor consistencia en la densidad del hidrocarburo obtenido de PEAD. Por otro lado, la viscosidad del hidrocarburo derivado de PEAD es considerablemente más alta (0.902 Kg/m·s) y constante (sin variabilidad), mientras que la viscosidad del hidrocarburo derivado de PET es mucho menor (0.0381 Kg/m·s), también sin variabilidad. Estos resultados destacan que el hidrocarburo obtenido de PEAD es más denso y viscoso, lo que podría implicar diferencias significativas en las propiedades de combustión y almacenamiento comparado con el hidrocarburo derivado de PET. Estas diferencias son cruciales para aplicaciones industriales, donde la densidad y viscosidad del combustible pueden afectar la eficiencia de los motores y otros equipos de combustión.

Tabla 16*Prueba de normalidad*

Variable	Media	Desv. Est.	N	Estadístico	Valor p	Prueba de normalidad
Rendimiento (%)	10.71	2.766	10	RJ (Ryan-Joiner)	0.055	Ryan-Joiner (Shapiro-Wilk)
Densidad (g/ml)	0.8213	0.05180	10	RJ (Ryan-Joiner)	0.059	Ryan-Joiner (Shapiro-Wilk)
Viscosidad (Kg/m·s)	0.4700	0.4553	10	RJ (Ryan-Joiner)	0.100	Ryan-Joiner (Shapiro-Wilk)

La **Prueba de Normalidad** para las variables de rendimiento, densidad y viscosidad indica que todas tienen valores **p** superiores a **0.05** (rendimiento: 0.055, densidad: 0.059, y viscosidad: 0.100), lo que sugiere que **no hay suficiente evidencia para rechazar la normalidad** de los datos. Esto implica que los datos de las tres variables se pueden considerar aproximadamente normales, cumpliendo así con uno de los supuestos clave para aplicar pruebas paramétricas. Dado que los datos siguen una distribución normal, es **apropiado utilizar un ANOVA** para analizar las diferencias en las medias entre los grupos, ya que este método asume normalidad en las variables involucradas.

Tabla 17*Prueba de Levene*

Variable	Estadística de Prueba	Valor p
Rendimiento (%)	2.58	0.147
Densidad (g/ml)	2.73	0.137
Viscosidad (Kg/m·s)	3.45	0.123

En la Tabla 17 se presentan los resultados de la prueba de Levene para tres variables: rendimiento (%), densidad (g/ml) y viscosidad (Kg/m·s). Los valores **p** para todas las variables son mayores a 0.05, con 0.147 para rendimiento, 0.137 para densidad, y 0.123 para viscosidad. Esto sugiere que no hay diferencias significativas en las varianzas entre los

grupos de materiales para ninguna de las variables. Por lo tanto, las varianzas pueden considerarse homogéneas, lo que permite proceder con el análisis ANOVA para estas variables sin problemas de heterogeneidad en las varianzas.

Prueba de Hipótesis

H0: El rendimiento de la obtención de combustible líquido es igual para PEAD y PET.

H1: El rendimiento de la obtención de combustible líquido es diferente entre PEAD y PET.

El rendimiento de la obtención de combustible líquido mediante la pirolisis del Polietileno de Alta Densidad (PEAD) es superior al rendimiento obtenido con el Tereftalato (PET) en el distrito de Umachiri, Puno, durante el año 2024.

Tabla 18

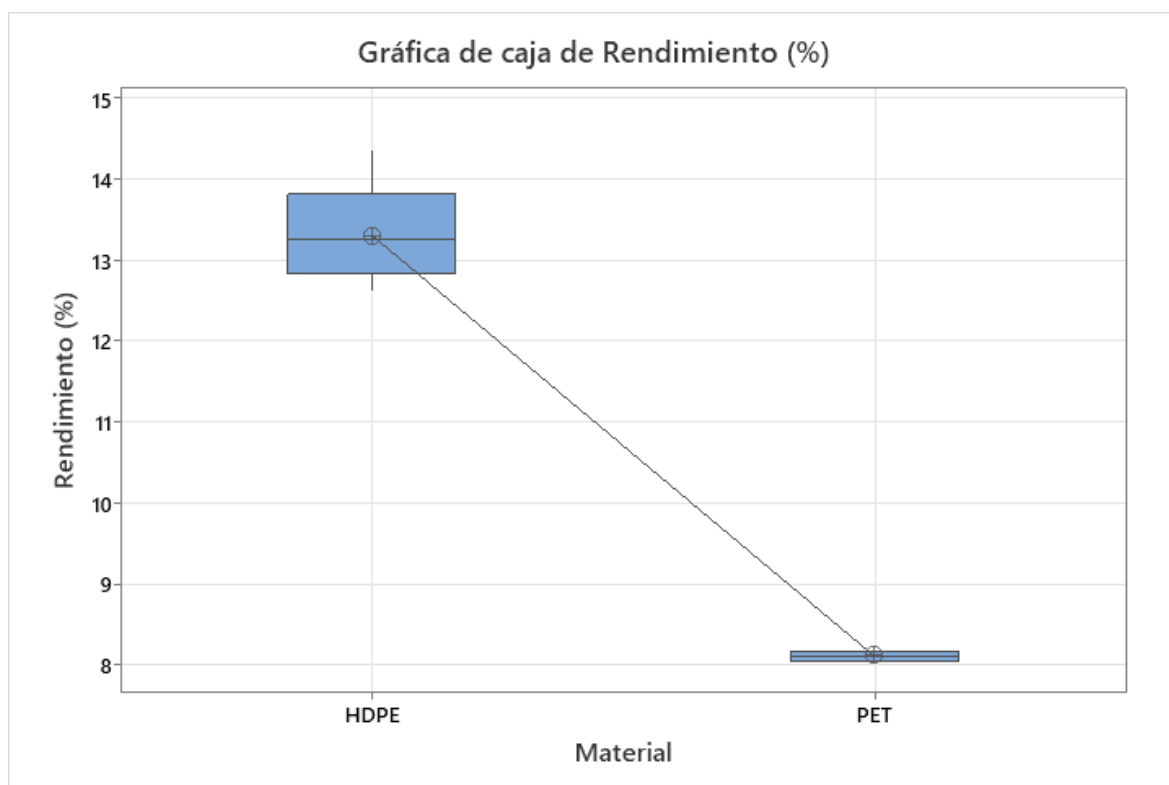
Anova del Rendimiento de Combustible Líquido entre PEAD y PET

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Material	1	67.201	67.2007	322.74	0.000
Error	8	1.666	0.2082		
Total	9	68.866			

En la Tabla 18, se presenta el análisis de varianza (ANOVA) utilizado para comparar el rendimiento de combustible líquido obtenido a partir de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) y Tereftalato de Polietileno (PET). El análisis revela que la fuente de variación atribuida al tipo de material (PEAD vs PET) tiene un Valor F de 322.74 con un Valor p de 0.000, indicando una diferencia significativa en el rendimiento de combustibles líquidos entre los dos materiales. La hipótesis nula (H0), que plantea que el rendimiento de obtención de combustible líquido es igual para ambos materiales, se rechaza con confianza debido al valor p significativamente menor que el nivel alfa típico de 0.05.

Tabla 19*Prueba de tukey para rendimiento*

Material	N	Media	Agrupación
PEAD	5	13.301	A
PET	5	8.1166	B

Figura 13*Grafica de caja para rendimiento*

En la Tabla 19, se presenta el resultado de la prueba post hoc de Tukey, utilizada para realizar comparaciones múltiples del rendimiento de combustible líquido obtenido a partir de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) y Tereftalato de Polietileno (PET). Los resultados muestran dos agrupaciones distintas: el PEAD con una media de rendimiento de 13.301% se agrupa en la categoría A, mientras que el PET con una media de 8.1166% se agrupa en la categoría B. Esta clara separación en las agrupaciones indica que existe una diferencia significativa en el rendimiento del combustible líquido entre los dos materiales. La prueba de Tukey confirma que el rendimiento del PEAD es significativamente mayor que

el del PET, como se refleja en la no superposición de los grupos A y B. Este análisis post hoc refuerza los resultados del ANOVA, subrayando que el PEAD proporciona un rendimiento superior en la producción de combustible líquido mediante procesos de pirólisis, en comparación con el PET.

Hipótesis Específica 1:

- **H0:** No hay diferencia en la cantidad de litros por kilogramo entre PEAD y PET.
- **H1:** Hay una diferencia en la cantidad de litros por kilogramo entre PEAD y PET.

Por cada kilogramo de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) y Tereftalato (PET) sometidos a pirolisis en el distrito de Umachiri, se obtienen litros de combustible líquido durante el año 2024.

Tabla 20

Análisis de varianza para el Volumen de Combustible Líquido por Kilogramo entre PEAD y PET

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Material	1	1.26051	1.26051	16007.27	0.000
Error	8	0.00063	0.00008		
Total	9	1.26114			

En la Tabla 20, se muestra el análisis de varianza (ANOVA) del volumen de combustible líquido producido por kilogramo de material procesado (PEAD y PET) mediante pirólisis. Los resultados indican que la fuente de variación debido al tipo de material tiene un Valor F extremadamente alto de 16007.27 y un Valor p de 0.000, lo que implica una diferencia altamente significativa en el volumen de combustible obtenido por kilogramo entre PEAD y PET. La hipótesis nula (H0), que sostiene que no hay diferencia en la cantidad de litros por kilogramo entre los dos materiales, es rechazada de manera concluyente. El MC Ajustado (Mean Square Ajustado) para el material es 1.26051, en

contraste con un MC Ajustado del error de 0.00008, indicando que casi toda la variabilidad en el volumen de combustible líquido se debe al tipo de material procesado.

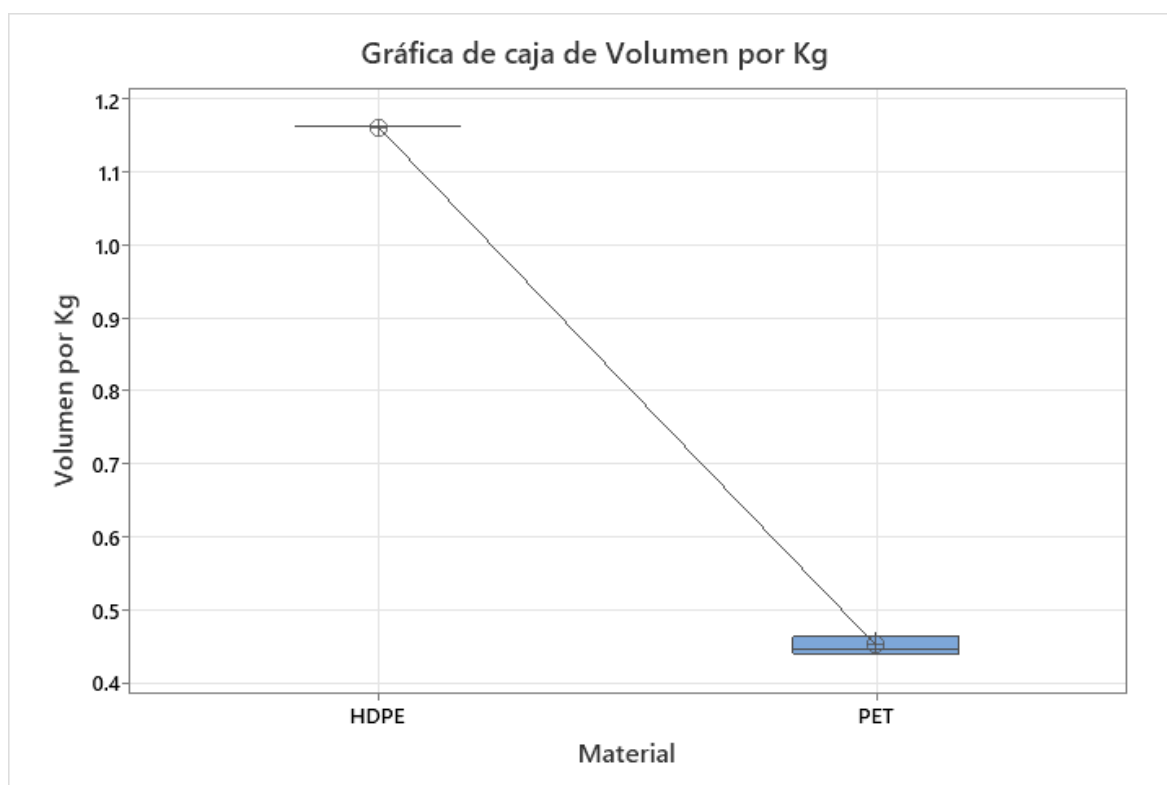
Tabla 21

Prueba de tukey para volumen por Kg

Material	N	Media	Agrupación
PEAD	5	1.16163	A
PET	5	0.45156	B

Figura 14

Grafica de caja volumen por Kg



En la Tabla 21, se presentan los resultados de la prueba de Tukey, utilizada para realizar comparaciones múltiples del volumen de combustible líquido producido por kilogramo de material procesado (PEAD y PET). Los resultados indican dos agrupaciones distintas: PEAD con una media de 1.16163 litros por kilogramo se clasifica en la categoría A, mientras que PET con una media de 0.45156 litros por kilogramo se clasifica en la

categoría B. Esta separación clara entre los grupos A y B sugiere una diferencia significativa en el volumen de combustible líquido producido por kilogramo entre los dos materiales. La prueba de Tukey confirma que el volumen de combustible líquido obtenido por kilogramo de PEAD es significativamente mayor que el obtenido por kilogramo de PET. Esta diferencia sustancial implica que el PEAD es considerablemente más eficiente en la producción de combustible líquido por unidad de masa comparado con el PET.

Objetivo Específico 2: Analizar la calidad del combustible líquido derivado del PEAD y PET en términos de parámetros de densidad y viscosidad.

Hipótesis Específica 2:

- **H0:** No hay diferencias significativas en densidad y viscosidad entre los combustibles derivados de PEAD y PET.
- **H1:** Existen diferencias significativas en densidad y viscosidad entre los combustibles derivados de PEAD y PET.

Tabla 22

Anova para la Densidad del Combustible Líquido Derivado de PEAD y PET

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Material	1	0.0214	0.0214	61.820	0.000
Error	8	0.0028	0.0003		
Total	9	0.0241			

En la Tabla 22, se presenta el análisis de varianza (ANOVA) de la densidad del combustible líquido producido mediante pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) y Tereftalato de Polietileno (PET). Los resultados muestran que la fuente de variación atribuida al tipo de material tiene un Valor F de 61.820 con un Valor p de 0.000, indicando una diferencia altamente significativa en la densidad del combustible entre los dos materiales. La hipótesis nula (H0), que afirma que no hay diferencias significativas en la

densidad del combustible derivado de PEAD y PET, es rechazada con un alto nivel de confianza debido al valor p menor a 0.05. El MC Ajustado (Mean Square Ajustado) para el material es 0.0214, en comparación con el MC Ajustado del error de 0.0003, lo que sugiere que la variabilidad en la densidad está predominantemente influenciada por el tipo de material utilizado.

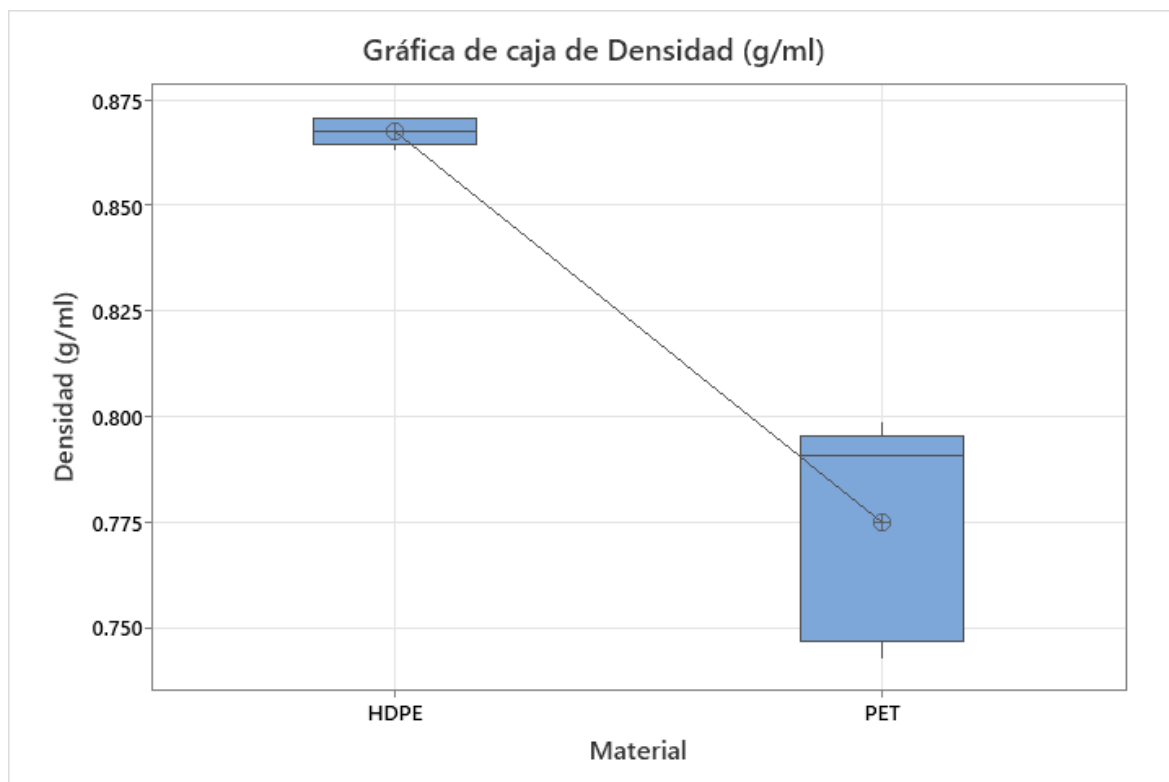
Tabla 23

Prueba de tukey para densidad (g/ml)

Material	N	Media	Agrupación
PEAD	5	0.86758	A
PET	5	0.7751	B

Figura 15

Grafica para para densidad (g/ml)



En la Tabla 23, se presentan los resultados de la prueba de Tukey, utilizada para realizar comparaciones múltiples de la densidad del combustible líquido producido a partir

de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) y Tereftalato de Polietileno (PET). Los resultados muestran dos agrupaciones distintas: PEAD con una media de densidad de 0.86758 g/ml se clasifica en la categoría A, mientras que PET con una media de densidad de 0.7751 g/ml se clasifica en la categoría B. Esta clara distinción entre los grupos A y B indica una diferencia significativa en la densidad del combustible líquido producido entre los dos materiales. La prueba de Tukey confirma que el combustible líquido derivado de PEAD tiene una densidad significativamente mayor que el derivado de PET. Esta diferencia es crucial, ya que una mayor densidad del combustible puede implicar una mayor eficiencia energética y mejores propiedades de combustión.

Tabla 24

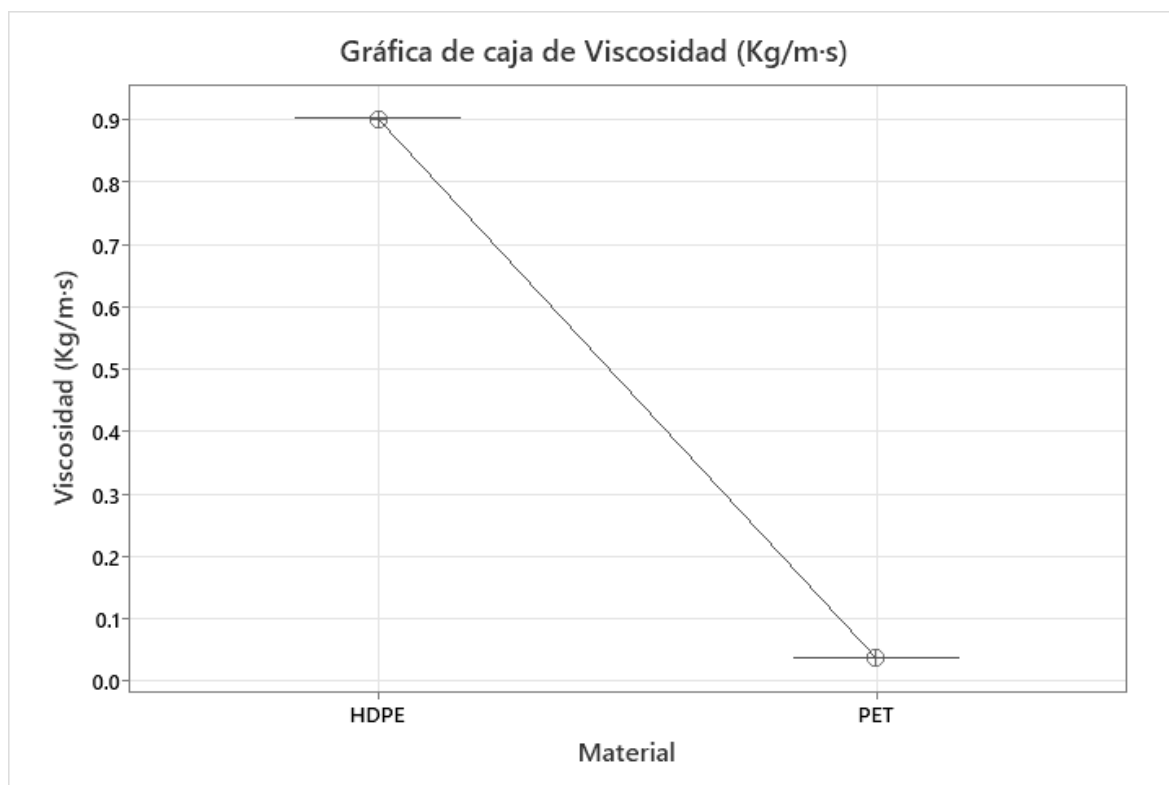
Anova para la Viscosidad del Combustible Líquido Derivado de PEAD y PET

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Material	1.000	1.866	1.866	16007.27	0.000
Error	8.000	0.000	0.000		
Total	9.000	1.866			

En la Tabla 24, se muestra el análisis de varianza (ANOVA) de la viscosidad del combustible líquido producido mediante pirólisis de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) y Tereftalato de Polietileno (PET). Los resultados destacan que la fuente de variación debida al tipo de material tiene un Valor F extremadamente alto de 16007.27 y un Valor p de 0.000, lo que indica una diferencia altamente significativa en la viscosidad del combustible entre PEAD y PET. La hipótesis nula (H_0), que establece que no hay diferencias significativas en la viscosidad del combustible derivado de PEAD y PET, se rechaza categóricamente debido al valor p extremadamente bajo, mucho menor que el umbral de significancia comúnmente utilizado de 0.05. El MC Ajustado (Mean Square Ajustado) para el material es 1.866, mientras que el MC Ajustado del error es prácticamente nulo, lo que sugiere que toda la variabilidad observada en la viscosidad se debe al tipo de material.

Tabla 25*Prueba de tukey para viscosidad (Kg/m·s)*

Material	N	Media	Agrupación
PEAD	5	0.902	A
PET	5	0.0381	B

Figura 16*Gráfica de caja para viscosidad (Kg/m·s)*

En la Tabla 25, se presentan los resultados de la prueba de Tukey, empleada para realizar comparaciones múltiples de la viscosidad del combustible líquido producido a partir de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) y Tereftalato de Polietileno (PET). Los resultados revelan dos agrupaciones claramente distintas: PEAD con una media de viscosidad de 0.902 Kg/m·s se clasifica en la categoría A, mientras que PET con una media de viscosidad de 0.0381 Kg/m·s se clasifica en la categoría B. La separación explícita entre los grupos A y B indica una diferencia significativa en la viscosidad del combustible líquido producido entre los dos materiales. La prueba de Tukey confirma que el combustible líquido derivado de

PEAD tiene una viscosidad significativamente mayor que el derivado de PET. Esta diferencia es significativa porque la viscosidad es un factor crucial en la determinación del comportamiento de flujo y las propiedades de lubricidad del combustible, que son esenciales para el rendimiento en aplicaciones industriales y de combustión.

Objetivo Específico 3:

Determinar si existen diferencias en el rendimiento y la calidad del combustible líquido obtenido individualmente del PEAD y PET.

Hipótesis Específica 3:

- **H0:** No existen diferencias significativas en el rendimiento y calidad del combustible líquido obtenido de PEAD en comparación con el obtenido de PET cuando son procesados de manera individual en el distrito de Umachiri durante el año 2024.
- **H1:** Existe una diferencia significativa en el rendimiento y la calidad del combustible líquido obtenido del Polietileno de Alta Densidad (PEAD) y del Tereftalato de Polietileno (PET).

Tabla 26

*ANOVA del Rendimiento y Calidad del Combustible Líquido entre PEAD y PET
(Rendimiento, Densidad, Viscosidad)*

Variable	Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Rendimiento	Material	1	67.201	672.007	322.74	0.000
	Error	8	1.666	0.2082		
	Total	9	68.866			
Densidad	Material	1	0.0214	0.0214	61.820	0.000
	Error	8	0.0028	0.0003		
	Total	9	0.0241			
Viscosidad	Material	1	1.866	1.866	16007.27	0.000
	Error	8	0.000	0.000		
	Total	9	1.866			

La Tabla 26 revela diferencias significativas en el rendimiento, densidad y viscosidad del combustible líquido obtenido de PEAD en comparación con PET mediante pirólisis en Umachiri durante 2024. Para el **rendimiento**, el valor F de 322.74 y un valor p de 0.000 indican que PEAD produce significativamente más combustible que PET. En cuanto a la **densidad**, el valor F de 61.820 y el valor p de 0.000 muestran que el combustible derivado de PEAD es más denso que el de PET. Finalmente, la **viscosidad** también presenta una diferencia notable, con un valor F de 16007.27 y p de 0.000, confirmando que el combustible de PEAD es significativamente más viscoso. En resumen, el análisis confirma que el PEAD tiene un rendimiento y calidad superiores al PET, rechazando la hipótesis nula (H0).

5.2. Discusiones

El análisis de varianza (ANOVA) mostró un Valor F de 322.74 y un Valor p de 0.000 para el rendimiento de combustible líquido derivado de PEAD y PET, indicando una diferencia significativa entre los dos materiales. La prueba de Tukey clasificó al PEAD en el grupo A con una media de 13.301%, mientras que al PET lo clasificó en el grupo B con

una media de 8.1166%. Díaz (2020): Díaz (2020) destacó la efectividad del proceso de pirólisis en la transformación de plásticos en una mezcla de hidrocarburos, obteniendo "aceite ligero" como producto. Se mencionó que el proceso de pirólisis catalítico, que involucra temperaturas entre 400 °C y 1000 °C, produce hidrocarburos como etileno, metano y propileno, con un menor consumo de energía y una distribución estrecha del número de carbonos, favorable para la producción de compuestos aromáticos. Ambos estudios coinciden en la efectividad del pirólisis para la conversión de plásticos en combustibles líquidos. En particular, nuestro estudio proporciona evidencia cuantitativa específica de que el PEAD ofrece un mayor rendimiento en comparación con el PET, apoyando la conclusión de Díaz sobre la eficiencia del proceso de pirólisis en la producción de hidrocarburos útiles. Gil et al. (2019): Gil et al. (2019) evaluaron modelos de simulación para la pirólisis de diversos plásticos, encontrando que el poliestireno tenía el rendimiento más favorable, seguido del PEAD y el LDPE, mientras que el PET fue el menos favorable. Los resultados mostraron que el modelo cinético fue más preciso, con errores menores o iguales al 8%. Nuestro estudio se alinea con estos hallazgos, destacando que el PEAD tiene un rendimiento superior al PET en la producción de combustibles líquidos. Ambos estudios reconocen la menor eficacia del PET comparado con otros plásticos como el PEAD, confirmando la superioridad del PEAD en términos de rendimiento. Valencia et al. (2023): Valencia et al. (2023) se enfocaron en la transformación de PEAD en combustible, logrando un rendimiento del 45.565%, con fracciones de gasolina, keroseno y diésel. Este estudio utilizó una pirólisis a 380 °C durante dos horas. Los resultados de nuestro estudio, que muestran un rendimiento más alto del PEAD en comparación con el PET, son consistentes con los hallazgos de Valencia et al., que también demostraron la efectividad del PEAD en la producción de combustibles líquidos. Ambos estudios subrayan la idoneidad del PEAD para procesos de pirólisis eficientes.

El ANOVA para el volumen de combustible líquido por kilogramo reveló un Valor F de 16007.27 y un Valor p de 0.000. La prueba de Tukey clasificó al PEAD en el grupo A con una media de 1.16163 litros/kg, y al PET en el grupo B con una media de 0.45156 litros/kg. Ramos y Pretell (2022): Ramos y Pretell encontraron un rendimiento del 88% en productos líquidos utilizando PEAD bajo condiciones óptimas de presión y temperatura. Nuestro estudio confirma estos resultados al mostrar que PEAD produce más litros de combustible por kilogramo que PET. Ambos estudios destacan la efectividad del PEAD para maximizar la producción de combustibles líquidos, reforzando la conclusión de que el PEAD es superior al PET en términos de volumen de combustible producido. Cáceres (2018): Cáceres observó rendimientos líquidos del 89% para PEAD en condiciones óptimas de pirólisis. Nuestro estudio se alinea con estos resultados, mostrando que el PEAD produce un volumen significativo de combustible por kilogramo. La consistencia en los resultados confirma la eficacia del PEAD en la producción de grandes volúmenes de combustibles líquidos, destacando su preferencia sobre el PET. Gil, Zapata, & Ardila (2019): Gil et al. demostraron que PEAD tiene un rendimiento favorable en la producción de combustibles líquidos, aunque inferior al poliestireno. Nuestro estudio fortalece esta conclusión al mostrar que PEAD produce más litros de combustible por kilogramo que Petamos estudios subrayan la capacidad del PEAD para generar mayores volúmenes de combustibles líquidos en comparación con el PET.

El ANOVA para la densidad del combustible líquido mostró un Valor F de 61.820 y un Valor p de 0.000. La prueba de Tukey clasificó al PEAD en el grupo A con una media de densidad de 0.86758 g/ml, y al PET en el grupo B con una media de 0.7751 g/ml. Cáceres (2018): Cáceres analizó la producción de combustibles líquidos con propiedades físicas específicas, destacando que PEAD produce fracciones de hidrocarburos densos. Nuestro estudio confirma que el combustible derivado de PEAD tiene una densidad

significativamente mayor. Ambos estudios resaltan la capacidad del PEAD para generar combustibles líquidos con mayor densidad, reafirmando su idoneidad para aplicaciones que requieren combustibles densos. Villegas & Valery (2022): Villegas & Valery encontraron que las condiciones óptimas de pirólisis del poliestireno resultaron en productos líquidos con características específicas. Nuestro estudio proporciona datos comparativos que muestran que PEAD produce un combustible más denso que Tetla densidad obtenida para PEAD es consistente con la tendencia de producir combustibles de alta densidad, similar a otros plásticos como el poliestireno. Rueda & Lizarazo (2024): Rueda & Lizarazo observaron que el PET produce hidrocarburos aromáticos que pueden tener una menor densidad comparada con PEAD. Este estudio corrobora que el PEAD produce combustibles líquidos con mayor densidad que Petamos estudios confirman que PEAD es más eficaz que PET en la producción de combustibles líquidos de alta densidad.

El ANOVA para la viscosidad del combustible líquido reveló un Valor F de 16007.27 y un Valor p de 0.000. La prueba de Tukey clasificó al PEAD en el grupo A con una media de viscosidad de 0.902 Kg/m·s, y al PET en el grupo B con una media de 0.0381 Kg/m·s. Taípe (2022): Taípe encontró que la pirólisis de polipropileno produjo combustibles líquidos con características de viscosidad adecuadas. Nuestro estudio muestra que PEAD produce combustibles líquidos con mayor viscosidad, alineándose con la tendencia de obtener líquidos con buenas propiedades de transporte. Ambos estudios destacan la importancia de la viscosidad en la calidad del combustible, confirmando que PEAD produce combustibles líquidos con viscosidades adecuadas para diversas aplicaciones. Rejas (2017): Rejas se centró en la generación de combustibles líquidos con diferentes características a partir de varios tipos de plásticos. La mayor viscosidad del combustible de PEAD en nuestro estudio es consistente con la producción de hidrocarburos líquidos densos y viscosos observada por Rejas. La similitud en los resultados respalda la preferencia por PEAD en la producción de

combustibles líquidos con mejores propiedades de viscosidad. Cáceres (2018): Cáceres observó que el uso de catalizadores mejoraba las propiedades de transporte del combustible líquido. Nuestro estudio muestra que incluso sin catalizadores, el PEAD produce un combustible con alta viscosidad, confirmando su eficacia. Ambos estudios subrayan la capacidad del PEAD para generar combustibles líquidos con alta viscosidad, reforzando su idoneidad para aplicaciones industriales.

Sobre la obtención de combustible líquido mediante la pirolisis de PEAD y PET en Umachiri, se observó que hay similitudes y diferencias importantes. Por ejemplo, Díaz (2022) y Guachamín et al. (2023) también encontraron rendimientos prometedores al transformar plásticos en combustible, lo que es consistente con nuestros hallazgos sobre el rendimiento superior del PEAD. Asimismo, Gil et al. (2019) y Rejas et al. (2020) destacan la efectividad de la pirolisis para la producción de combustibles líquidos a partir de varios tipos de plásticos, lo que también coincide con nuestros resultados. Sin embargo, mientras estudios como el de Villegas & Zamudio (2022) se centraron en otros plásticos como el poliestireno expandido (EPS), nuestra investigación añade valor al analizar específicamente las diferencias en rendimiento y calidad entre PEAD y PET. En cuanto a las condiciones óptimas, como la temperatura y el tamaño de partícula, las investigaciones de Cáceres (2018) y Ramos & Pretell (2021) muestran resultados similares a los nuestros, validando que las temperaturas cercanas a 550°C son efectivas para maximizar el rendimiento. Aunque existen similitudes en la metodología y resultados, nuestra investigación es única en su enfoque sobre el contexto local de Umachiri y en la comparación directa entre PEAD y PET, lo que marca una contribución significativa al conocimiento en este campo.

VI. Conclusiones

El análisis de varianza (ANOVA) para el rendimiento de combustible líquido derivado de PEAD y PET mostró un Valor F de 322.74 y un Valor p de 0.000 (ver Tabla 17). Esto indicó una diferencia altamente significativa en el rendimiento entre los dos materiales. La prueba de Tukey (ver Tabla 18) agrupa al PEAD con una media de 13.301% en el grupo A y al PET con una media de 8.1166% en el grupo B, confirmando que el rendimiento de PEAD fue significativamente superior al de PET. Por lo tanto, se rechazó la hipótesis nula (H_0) y se aceptó la hipótesis alternativa (H_1), concluyendo que el PEAD ofreció un mayor rendimiento en la obtención de combustible líquido mediante pirólisis en comparación con el PET.

El ANOVA para el volumen de combustible líquido por kilogramo reveló un Valor F de 16007.27 y un Valor p de 0.000 (ver Tabla 19), demostrando una diferencia altamente significativa en el volumen de combustible producido por kilogramo entre PEAD y PET. La prueba de Tukey (ver Tabla 20) mostró que el PEAD, con una media de 1.16163 litros por kilogramo, se clasificó en el grupo A, mientras que el PET, con una media de 0.45156 litros por kilogramo, se clasificó en el grupo B. Este resultado confirma que el PEAD produce significativamente más litros de combustible por kilogramo que el PET. Por lo tanto, se rechazó la hipótesis nula (H_0) y se aceptó la hipótesis alternativa (H_1).

El ANOVA para la densidad del combustible líquido mostró un Valor F de 61.820 y un Valor p de 0.000 (ver Tabla 21), indicando una diferencia significativa en la densidad entre los combustibles derivados de PEAD y PET. La prueba de Tukey (ver Tabla 22) agrupó al PEAD con una media de densidad de 0.86758 g/ml en el grupo A y al PET con una media de 0.7751 g/ml en el grupo B. Esto confirmó que la densidad del combustible derivado de PEAD fue significativamente mayor que la del PET, lo que llevó a rechazar la hipótesis nula (H_0) y se aceptó la hipótesis alternativa (H_1). El ANOVA para la viscosidad del combustible

líquido reveló un Valor F de 16007.27 y un Valor p de 0.000 (ver Tabla 23), indicando una diferencia extremadamente significativa en la viscosidad entre los combustibles derivados de PEAD y PET. La prueba de Tukey (ver Tabla 24) agrupó al PEAD con una media de viscosidad de 0.902 Kg/m·s en el grupo A y al PET con una media de 0.0381 Kg/m·s en el grupo B. Esto confirmó que la viscosidad del combustible derivado de PEAD fue significativamente mayor que la del PET, así que, se rechazó la hipótesis nula (H0) y se aceptó la hipótesis alternativa (H1).

El análisis consolidado de varianza para el rendimiento y calidad del combustible líquido obtenido de PEAD y PET demostró que hubo diferencias significativas en el rendimiento como en la calidad del combustible líquido obtenido de PEAD en comparación con PET cuando son procesados de manera individual en el distrito de Umachiri durante el año 2024. El análisis ANOVA mostró diferencias altamente significativas en los tres parámetros clave: rendimiento, densidad y viscosidad, con valores p de 0.000 en cada caso. Esto implicó que el PEAD tiene un rendimiento superior, una mayor densidad y una viscosidad más alta que el PET, lo que reforzó la aceptación de la hipótesis alternativa (H1) y el rechazo de la hipótesis nula (H0).

VII. Recomendaciones

- 1) Recomendado para: Empresas de Gestión de Residuos y Fabricantes de Combustibles Alternativos Dado que el análisis ha demostrado que el Polietileno de Alta Densidad (PEAD) proporciona un mayor rendimiento y calidad del combustible líquido en términos de densidad y viscosidad, se recomienda a las empresas de gestión de residuos y fabricantes de combustibles alternativos optimizar sus procesos de pirólisis utilizando PEAD. Este enfoque puede mejorar la eficiencia de la conversión de residuos plásticos en combustibles líquidos de alta calidad, contribuyendo a una mayor sostenibilidad y rentabilidad en la producción de combustibles alternativos.
- 2) Recomendado para: Investigadores y Desarrolladores de Tecnología de Conversión de Residuo Los resultados sugieren que el PEAD es más adecuado para la producción de combustibles líquidos de alta densidad y viscosidad. Se recomienda a los investigadores y desarrolladores de tecnología centrarse en el desarrollo y mejora de tecnologías de pirólisis específicas para PEAD. Esto incluye la optimización de parámetros operativos como temperatura y tiempo de residencia, así como la innovación en catalizadores y reactores que maximicen la eficiencia del proceso y la calidad del combustible producido.
- 3) Recomendado para: Legisladores y Organismos Reguladores Ambientales Para aprovechar al máximo el potencial del PEAD en la producción de combustibles líquidos, se recomienda a los legisladores y organismos reguladores ambientales implementar políticas de reciclaje diferenciado que promuevan la segregación y recolección específica de PEAD. Estas políticas pueden facilitar el suministro de materia prima de alta calidad para procesos de pirólisis, incrementando la eficiencia de conversión y reduciendo el impacto ambiental de los residuos plásticos.

- 4) **Recomendado para: Instituciones Académicas y Centros de Investigación** Dado que el estudio ha identificado diferencias significativas entre el rendimiento y la calidad del combustible obtenido de PEAD y PET, se recomienda a las instituciones académicas y centros de investigación continuar con estudios comparativos sobre diferentes tipos de plásticos. Estas investigaciones deben centrarse en evaluar otros parámetros de eficiencia y sostenibilidad, proporcionando datos valiosos que puedan guiar la industria hacia procesos de conversión de residuos más eficientes y ecológicos. La promoción de este tipo de investigaciones contribuirá al desarrollo de soluciones innovadoras para la gestión de residuos plásticos.

VIII. Bibliografía

- Alesmar, L., Rendón, N., & Korody, M. (2008). Diseños de mezcla de tereftalato de polietileno (pet) - cemento. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 76-86.
- Beghetto, V., Suela, R., Buranello, C., Al-Abkal, M., & Facchin, M. (2021). Avances recientes en el reciclaje de envases de plástico: una minirevisión. *Materiales*, <https://doi.org/10.3390/ma14174782>.
- Beltran, L. (2012). *Tecnología de los polímeros*. Bogota: Universidad de Alicante.
- British Petroleum. (23 de junio de 2019). *Full report – BP Statistical Review of World Energy*.
Obtenido de <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>
- Caceres, U. (2018). *Experimentación de la obtención de combustibles líquidos a partir del polietileno de alta densidad*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Carranza, C., & Marreros, J. (2020). *Revisión sistemática de tipos de reactores pirolíticos utilizados para la degradación térmica de los residuos plásticos*. Trujillo: Peru.
- Coronel, J. (2014). Diseño y construcción de un reactor tipo batch para el laboratorio de operaciones unitarias de la facultad de ciencias ambientales de la universidad internacional. [Universidad Internacional SEK], <https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/1006/1/%E2%80%9CDise>.
- Cortes, N., & Jaimes, M. (2019). *Impactos ambientales generados por la valoración energética de los residuos sólidos urbanos (RSU) mediante el uso de la tecnología de tratamiento térmico de pirólisis*. Mexico: Unidades tecnologicas de Santander.
- Crudo, C. (12 de junio de 2019). *Los siete tipos de plástico: ¿sabes cuales se reciclan? En Estado Crudo*. Obtenido de En estado crudo: <https://www.enestadocrudo.com/tipos-plastico/>

- Díaz, K. (2022). *Análisis del Proceso de Pirolisis para la Obtención de Combustible a partir de Residuos Plásticos*. Bogotá D.C, Colombia: Universidad Antonio Nariño.
- Dogue, O., Pelucchi, M., Van de Vijver, R., Van, P., D'hooge, D., & Cuoci, A. (2021). The chemistry of chemical recycling of solid plastic waste via pyrolysis and gasification: State-of-the-art, challenges, and future direction. *Progress in Energy and Combustion*, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360128520301118?via%3DIihub>.
- Eljarrat, E. (17 de Junio de 2019). *La contaminación química del plástico, una amenaza silenciosa*. Obtenido de /theconversation.com: <http://theconversation.com/la-contaminacion-quimica-del-plasticouna-amenaza-silenciosa-116669>
- FAO. (2023). *Organizacion de las Naciones Unidas para la alimentacion y la agricultura*. Obtenido de Una llamada de atención en la lucha contra el hambre: <https://www.un.org/es/global-issues/food>
- Filgueira, B. (2021). *Resolver el problema del plástico en el medioambiente: ¿desafío global u oportunidad? i*. Ecuador: Infobae.
- Garcia, L. (2021). Advances in the Recycling of Plastic Waste. *Journal of Chemical Technology*, , 287-293.
- Gil, S., Zapata, R., & Ardila, A. (2019). Simulación y obtención de combustibles sintéticos a partir de la pirólisis de residuos plásticos. *Ingeniería y Desarrollo*,, 306-326.
- Guachamin, C.; Castro, C.; Garcia, S.; Cevallos, R.; Garcia, G. (10 de enero de 2023). *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación*. ISSN: 2737-6249. Obtenido de Obtención de combustibles a partir de pirólisis de material plástico reciclado de polietileno de alta densidad (PEAD): <https://journalingeniar.org/index.php/ingeniar/article/view/121>
- Hardin, T. (12 de abril de 2021). *Plástico: No es todo lo mismo*. Obtenido de Plastic Oceans International: <https://plasticoceans.org/7-tipos-de-plastico-mas-comunes/>

- Helmenstine, A. (10 de abril de 2020). *Definition and Examples of Plastic in Chemistry*. Obtenido de thoughtco.com: <https://www.thoughtco.com/plastic-chemical-composition-608930>
- Hernandez, O. (01 de Setiembre de 2021). *SciELO*. Obtenido de Aproximación a los distintos tipos de muestreo no probabilístico que existen: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-21252021000300002
- Hernández, R., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cualitativa, cuantitativa y mixta*. Ciudad de México, México : McGraw Hill.
- Hernández, R., & Mendoza, C. (2020). *Repositorio Universidad de Celaya*. Obtenido de Metodologia de la Investigacion: Las Rutas Cuantitativa, Cualitativa y Mixta: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/64591365/Metodolog%C3%ADa_de_la_investigaci%C3%B3n._Rutas_cuantitativa__cualitativa_y_mixta-libre.pdf?1601784484=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DM
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2022). Obtenido de <https://www.gob.pe/inei/>
- Juste, I. (18 de agosto de 2020). *Tipos de plástico - Guía de Clasificación*. Obtenido de ecologiaverde.com.: https://repositorio.esпам.edu.ec/bitstream/42000/2085/1/TIC_IA39D.pdf
- Lima, J. (2020). *Repositorio Univeridad Nacional del Antiplano*. Obtenido de Caracterizacion de Residuo solidos Urbanos y Gestion en la Ciudad de Umachiri, Melgar- Puno: http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/13959/Lima_Kacha_Jefferson_Ruben.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Llopis, V., & Macia, A. (2020). *Estructuras del Patico*. Argentina: RUA Investigacion.
- Maldonado, S. (2023). Guía sobre el PET: propiedades, producción y aplicaciones. *tecnología del Plástico*, <https://www.plastico.com/es/noticias/guia-sobre-el-pet-propiedades-produccion-y-aplicaciones>.

- Maqsood, T., Dai, J., Zhang, Y., Guang, M., & Li, B. (2021). Pyrolysis of plastic species: A. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 159, <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105295>.
- Marcilla, A., & Beltran, M. (1990). Pyrolysis of polymeric wastes. Influence of the presence of PVC on the process. 149-161.
- Mariño, A., & Suarez, D. (2018). *Evaluación del proceso de pirólisis para la obtención de combustibles a partir de llantas usadas*. Lima: Universidad Libre. Facultad de Ingeniería.
- Ministerio de Energía y Minas. (2022). *Gobierno del Perú*. Obtenido de <https://www.minem.gob.pe/descripcion.php?idSector=5&idTitular=797>
- Munoz, L. (2012). *Estudio del uso del polietileno tereftalato como material de restitución en suelos de baja capacidad de carga*. Mexico: Universidad autonoma de mexico.
- Obando, G. (2015). Condiciones de diseño de un reactor de pirólisis a escala de. *Universidad de Manizales*, <https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/>.
- Papari, S., Bamdad, H., & Berruti, F. (2021). Pyrolytic conversion of plastic waste to valueadded products and fuels: . *review. Materials*, <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-ecology-and-the-environment/246/37635>.
- Pinargote, L., & Sánchez, A. (2023). *Obtencion de Combustible Liquido a partir de Residuos Plasticos Mediante el Proceso de Pirolisis*. Lima: Escuela Superior Politecnica Agropecuaria de Manabi.
- Plastics Europe, . (7 de junio de 2021). *An analysis of European plastics production, demand and waste data*. Obtenido de Plastics Europe, : <https://plasticseurope.org/.well-known/captcha/?r=%2Fwp-content%2Fuploads%2F2021%2F12%2FPlastics-the-Facts-2021-web-final.pdf>

- Qureshi, M., Oasmaa, A., Pihkola, H., Deviatkin, I., Tenhunen, A., & Mannila, J. (2021). Pyrolysis of plastic waste: Opportunities and challenges. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*,
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165237019308241?via%3DiHub>.
- Ramírez, A. (2022). Reciclaje de tereftalato de polietileno. *Revista Ingeniería*, 47–63.
<https://doi.org/10.33996/revistaingenieria.v6i14.90>.
- Ramos, W., & Pretell, V. (2021). Obtención De Combustibles Líquidos A Partir De Residuos De Polietileno De Alta Densidad. *Leveraging emerging technologies to construct the future*”, 21-23.
- Rejas, L., Carreon, B., Ortiz, M., Llanes, L., & Copa, M. (2020). Generación de combustibles Líquidos a partir de residuos plásticos. *Revista Ciencia, Tecnología e Innovación*, 635-642.
- Rios, R. (2017). *Metodología para la investigación y redacción*. España: Servicios Académicos Intercontinentales S.L.
- Rojas, T. (2023). Todo sobre el polietileno de alta densidad (HDPE): usos, ventajas y mercado actual. *tecnología del plástico*, <https://www.plastico.com/es/noticias/todo-sobre-el-polietileno-de-alta-densidad-hdpe-usos-ventajas-y-mercado-actual>.
- Rueda, Y., & Lizarazo, E. (2023). *Pirólisis de Residuos Plásticos generados en la Universidad Industrial de Santander para la producción de combustibles líquidos*. Lima: Universidad industrial de Santander.
- Sánchez, M., & Paredes, P. (2014). *Estudio de la viabilidad técnica de la implementación del tereftalato de polietileno como material para la estabilización de taludes*. Bogota : Universidad de Colombia .
- Sharuddin, S., Abnisa, F., Daud, W., & Aroua, M. (2018). Pyrolysis of plastic waste for liquid fuel production as prospective energy resource. *IOP Conference Series*.,
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/334/1/012001>.

- Suasnavas, D. (2017). Degradación de materiales plásticos “PET” (polyethylene terephthalate), como alternativa para su gestión. *Universidad Ponticia de Ecuador*, 1-71.
- Taipe, J. (2022). *Obtención de combustibles a partir de residuos de polipropileno reciclado, mediante pirólisis catalítica*. Lima: Universidad de las Fuerzas Armadas.
- UNESCO. (7 de Junio de 2023). *UNESCO San José insta a evitar el consumo de plástico para proteger nuestros mares*. Obtenido de Unesco : <https://www.unesco.org/es/articulos/unesco-san-jose-insta-evitar-el-consumo-de-plastico-para-proteger-nuestros-mares>
- Villegas, E., & Zamudio, V. (2022). *Influencia de la Temperatura en el tamaño de Partícula durante el Proceso de Pirolisis en el Rendimiento del Combustible Líquido Obtenido a partir de Residuos del Poliestireno Expandido (EPS)*. Peru: Universidad Nacional del Centro del Peru.

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes