

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA PETROQUÍMICA



TESIS

**EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO Y COMPOSICIÓN DE LOS LÍQUIDOS
OBTENIDOS A PARTIR DE LA PIRÓLISIS TÉRMICA EN UN REACTOR
SEMICONTINUO UTILIZANDO UNA MEZCLA DE RESIDUOS PLÁSTICOS DE
POLIPROPILENO Y POLIESTIRENO**

Presentado por:

- Br. Daniel Brayan Ayme Aymi
- Br. María Fernanda Corzaao Pimentel

**Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Petroquímico**

Asesor:

Mgt. Washington Julio Lechuga Canal

CUSCO – PERÚ
2023

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, asesor del trabajo de investigación/tesis titulado:.....~~EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO Y COMPOSICIÓN DE LOS LÍQUIDOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA PIROLÍISIS TÉRMICA EN UN REACTOR SEMICONTINUO UTILIZANDO UNA MEZCLA DE RESIDUOS PLÁSTICOS DE POLIPROPILENO Y POLIESTIRENO~~ **Ayme Aymi Daniel Brayán; Corazao Pimentel María Fernanda** presentado por:

con Nro. de DNI: 72716699 / 74045125, para optar el título profesional/grado académico de Ingeniero Petroquímico

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por.....⁰¹ veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del *Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC* y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de.....^{2%}

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** la primera hoja del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 05 de octubre de 2023



Firma
Post firma Washington Julio Lechuga Canal

Nro. de DNI 23801349

ORCID del Asesor 0000-0003-1967-1720

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid:27259:273020807

NOMBRE DEL TRABAJO

**TESIS PIRÓLISIS TÉRMICA REACTOR SE
MICONTINUO - POLIPROPILENO Y POLIE
STIRENO - Corazao Pimentel - Ay**

AUTOR

Ayme Aymi - Corazao Pimentel

RECUENTO DE PALABRAS

23999 Words

RECUENTO DE CARACTERES

130347 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

129 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

1.9MB

FECHA DE ENTREGA

Oct 5, 2023 2:49 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Oct 5, 2023 2:51 PM GMT-5**● 2% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos

- 1% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 1% Base de datos de trabajos entregados
- 0% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Coincidencia baja (menos de 20 palabras)
- Material citado
- Bloques de texto excluidos manualmente

DEDICATORIA

Dedicamos el presente trabajo a nuestras familias, por su apoyo incondicional. En este capítulo que parecía no tener un final a la vista. Fueron ustedes quienes siempre nos brindaron su apoyo y motivación incondicional. Además de enseñarnos que a partir de nuestro esfuerzo y dedicación lograremos nuestras metas.

AGRADECIMIENTO

Queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos a nuestro asesor de tesis Mgt. Julio Lechuga Canal por el invaluable apoyo recibido durante el tiempo que ha durado este trabajo de investigación. Sus conocimientos, orientación, motivación, paciencia, dedicación y esfuerzo fueron fundamentales en el desarrollo de esta tesis y en nuestra formación como ingenieros.

Asimismo, queremos destacar su labor como docente, mediante el cual, además de los conocimientos, inculca en sus alumnos un sentido de ética, seriedad, responsabilidad y rigor académico que todo profesional debe tener. Solo nos queda expresar nuestra profunda admiración por su trabajo y compromiso diario en la formación de futuros ingenieros que el país y el mundo necesitan.

ÍNDICE

GLOSARIO	1
RESUMEN	3
ABSTRACT.....	4
INTRODUCCIÓN	5
CAPÍTULO I: GENERALIDADES	6
1. GENERALIDADES	6
1.1. Planteamiento del problema.....	6
1.2. Formulación del problema	7
1.2.1. Problema general.....	7
1.2.2. Problemas específicos	7
1.3. Justificación.....	8
1.3.1. Justificación social	8
1.3.2. Justificación ambiental.....	9
1.3.3. Justificación técnica	9
1.4. Objetivos	10
1.4.1. Objetivo general	10
1.4.2. Objetivos específicos.....	11
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	12
2. MARCO TEÓRICO.....	12

2.1. Antecedentes de la investigación	12
2.1.1. Antecedentes nacionales	14
2.1.2. Antecedentes internacionales.....	15
2.2. Marco conceptual.....	17
2.2.1. Plásticos	17
2.2.1.1 Propiedades de los plásticos.....	17
2.2.1.2. Clasificación de los plásticos	18
2.2.2. Polipropileno (PP).....	20
2.2.2.1. Propiedades físicas.....	21
2.2.2.2. Descomposición térmica del polipropileno (PP)	22
2.2.2.3. Aplicaciones del polipropileno (PP).....	23
2.2.3. Poliestireno (PS)	23
2.2.3.1. Propiedades físicas.....	25
2.2.3.2. Descomposición térmica del poliestireno (PS).....	26
2.2.3.3. Aplicaciones del poliestireno (PS).....	27
2.2.4. Residuos plásticos.....	28
2.2.6.1. Factores en la generación de desechos plásticos.....	29
2.2.5. Pirólisis térmica	30
2.2.7.1. Tecnologías de pirólisis convencional	31
2.2.7.2. Productos de la pirólisis	32
2.2.7.3. Parámetros del proceso de pirólisis convencional	34

2.2.7.4. Tipo de reactor para pirólisis	36
2.2.6. Caracterización de una fracción de petróleo	38
2.2.8.1. Punto de ebullición y curva de destilación	38
2.2.8.2. Densidad y gravedad específica.....	41
2.2.8.3. Peso molecular	41
2.2.8.4. Índice de refracción.....	42
2.2.8.5. Parámetro “m”	42
2.2.8.6. Análisis de la composición	43
CAPITULO III: METODOLOGIA DE INVESTIGACION.....	46
3. Metodología	46
3.1. Hipótesis y especificación de variables	46
3.1.1. Hipótesis general.....	46
3.1.2. Hipótesis específicas	46
3.2. Variables propuestas para el proceso de pirólisis térmica	46
3.2.1. Operacionalización De Las Variables.....	48
3.2.2. Matriz de consistencia.....	49
3.3. Tipo y diseño de investigación	51
3.3.1. Tipo y diseño de investigación	51
3.3.2. Diseño Experimental.....	51
3.3.3. Desarrollo de la investigación.....	53
3.3.3.1. Primera etapa	53

3.3.3.2 Segunda etapa	53
3.3.3.3 Tercera etapa.....	54
3.4. Unidad de análisis	56
3.5. Variables	56
3.5.1. Variables independientes	56
3.5.2. Variables dependientes	56
3.6. Tamaño de muestra	56
3.7. Recolección de datos.....	56
3.8. Desarrollo experimental.....	57
3.9. Materiales, equipos y materia prima.....	60
3.9.1. Materiales.....	60
3.9.2. Reactivos.....	60
3.9.3. Equipos	60
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	64
4.1. Proceso de pirólisis adaptado para el PP y PS	64
4.2. Resultados de la caracterización de la materia prima	66
4.1.1. Determinación del tipo de poliestireno y su densidad	66
4.1.2. Determinación del tipo de polipropileno y su densidad.....	67
4.2. Productos derivados de la pirólisis térmica de la mezcla PP y PS.....	68
4.2.1. Fracción líquida	68
4.2.2. Fracción sólida	69

4.2.3. Fracción gaseosa	70
4.3. Rendimiento de los productos finales	71
4.3.1. Rendimiento de productos de pirólisis.....	71
4.3.2. Análisis Estadístico	74
4.4. Perfil de temperatura.....	77
4.5. Análisis físico-químico de la fracción líquida	78
4.5.1. Resultados de la medición de densidad e índice de refracción	79
4.5.2. Resultados del Intercepto de Refractividad	82
4.5.3. Resultados de la medición de destilación al vacío de la fracción líquida	83
4.6. Análisis de composición de la fracción líquida	88
4.6.1. Resultados del cálculo de Parafinas, Naftenos y Aromáticos.....	88
4.6.2. Análisis estadístico.....	91
CONCLUSIONES	94
RECOMENDACIONES.....	95
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	96
APÉNDICE.....	102
Apéndice 1. Datos de rendimiento de la fracción líquida obtenido en la pirólisis térmica.....	102
Apéndice 2. Reporte de ensayo.....	103
Apéndice 3. Informes de ensayo	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Instalaciones industriales para pirólisis de plásticos.....	13
Tabla 2 Propiedades físicas del polipropileno	22
Tabla 3 Propiedades físicas del Poliestireno.....	25
Tabla 4 Intervalos de ebullición de fracciones típicas de petróleo crudo	39
Tabla 5 Principales productos de la destilación atmosférica de crudo	39
Tabla 6 Valores de los Factores de Caracterización	43
Tabla 7 Variables que intervienen en el proceso de pirólisis térmica.....	48
Tabla 8 Matriz de consistencia.....	49
Tabla 9 Variables y niveles del diseño factorial	52
Tabla 10 Matriz de diseño.....	52
Tabla 11 Combinaciones de los niveles experimentales.....	53
Tabla 12 Rendimiento de productos finales de la pirólisis térmica	71
Tabla 13 <i>Datos de resumen del modelo</i>	74
Tabla 14 <i>Análisis de varianza (ANOVA)</i>	75
Tabla 15 Mediciones de la densidad e índice de refracción de los líquidos pirolíticos obtenidos.....	79
Tabla 16 Intercepto de refractividad de líquidos pirolíticos obtenidos.....	82
Tabla 17 Destilación ASTM D1160 de la fracción líquida obtenida.....	83
Tabla 18 Curva de destilación ASTM D1160, TBP y ASTM D86	85
Tabla 19 Parafinas, Naftenos y Aromáticos presentes en la fracción líquida.....	88
Tabla 20 Cuadro comparativo de propiedades fisicoquímicas y composición de PNA	89
Tabla 21 Cuadro comparativo de propiedades fisicoquímicas y composición de PNA	90

Tabla 22 <i>Datos de resumen del modelo</i>	92
Tabla 23 <i>Análisis de varianza (ANOVA)</i>	92
Tabla 24 Rendimiento de la fracción líquida para una alimentación PP/PS 3:1.....	102
Tabla 25 Rendimiento de la fracción líquida para una alimentación PP/PS 1:3.....	102

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Estructura química del polipropileno	20
Figura 2 TGA del PP comercial.....	23
Figura 3 Estructura química del Poliestireno.....	24
Figura 4 Estructura del Poliestireno de alto impacto	25
Figura 5 TGA del PS de Alto Impacto Comercial y Modificado	26
Figura 6 TGA de la Espuma de Poliestireno	27
Figura 7 Distribución de vida útil de los plásticos según segmento de uso.....	29
Figura 8 Desechos plásticos de productos de vida relativamente corta.....	30
Figura 9 Contorno y valor de la temperatura dentro del reactor semicontinuo	37
Figura 10 Flujograma del proceso pirólisis para la presente investigación.....	55
Figura 11 Diagrama de procedimiento para el desarrollo experimental.....	59
Figura 12 Reactor de Pirólisis.....	61
Figura 13 Diagrama esquemático del reactor de pirólisis.....	63
Figura 14 Diagrama PFD del proceso de pirólisis	65
Figura 15 Prueba de Densidad para PS.....	66
Figura 16 Prueba de Densidad para PP.....	67
Figura 17 Fracción líquida resultante de la pirólisis térmica.....	68
Figura 18 Fracción sólida resultante de la pirólisis térmica	69
Figura 19 Fracción gaseosa resultante de la pirólisis térmica	70
Figura 20 Rendimiento de líquidos pirolíticos con desviación estándar	72
Figura 21 <i>Diagrama de Pareto de efectos estandarizados, respuesta en % líquidos</i>	76
Figura 22 Perfil de Temperatura durante la Pirólisis Térmica a 450°C de la Mezcla PP/PS.....	77
Figura 23 Densidad de líquidos pirolíticos obtenidos PP/PS	80

Figura 24 Índice de refracción de líquidos pirolíticos PP/PS 81

Figura 25 Curva de destilación ASTM D1160 y una función logarítmica normal.... 84

Figura 26 Rendimiento de productos usando la ASTM D86 para un ratio PP/PS 1:3
 86

Figura 27 Rendimiento de productos usando la ASTM D86 para un ratio PP/PS 3:1
 87

Figura 28 Distribución de la composición de Parafinas, Naftenos y Aromáticos en la
 fracción líquida 89

Figura 29 *Diagrama de Pareto de efectos estandarizados, respuesta en % parafinas*
 93

GLOSARIO

ANOVA	Análisis de Varianza
m³	Metro Cúbico
°C	Grados Centígrados
K	Grados Kelvin
g	Gramos
V	Volumen
P_o	Presión atmosférica
T_o	Temperatura atmosférica
Km	Kilómetro
Gal	Galón
min	minuto
dm³	decímetro cúbico
INEI	Instituto Nacional de estadística e informática
SINIA	Sistema Nacional de Información Ambiental
MINAM	Ministerio del Ambiente
DIGESA	Dirección general de salud ambiental
NAT	Nivel de Avance Tecnológico
PP	polipropileno

PS	Poliestireno
PET	Polietilentereftalato
PVC	Policloruro de vinilo
ULDPE	Polietileno de ultra baja densidad
VLDPE	Polietileno de muy baja densidad
LDPE	Polietileno baja densidad
LLDPE	Polietileno lineal de baja densidad lineal
MDPE	Polietileno de densidad media
HDPE	Polietileno de alta densidad
UHMWPE	Polietileno de ultra alto peso molecular
PA	Poliamidas
OECD	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
N₂	Nitrógeno
He	Helio
EPS	Poliestireno expandido
PNA	Parafinas, Naftenos y Aromáticos
GN	Gas Natural
HCL	Ácido Clorhídrico

RESUMEN

La finalidad del presente trabajo de investigación es la evaluación del rendimiento y composición de la fracción líquida obtenida mediante un proceso de pirólisis térmica, en el cual se utilizó como materia prima combinaciones en diferentes porcentajes de polipropileno (PP) y poliestireno (PS). Las variables independientes usadas fueron: temperaturas de 415 y 450 °C, ratios de alimentación de PP/PS: 3/1 y 1/3 y tamaños de partícula de 5-10 mm y 20 -24 mm. El proceso de pirólisis se llevó a cabo en un reactor semicontinuo al cual se le agregó gas nitrógeno con el fin de crear una atmósfera neutra propia del proceso de pirólisis. La cantidad de muestra de materia prima que fue ingresada al reactor en cada experiencia fue de 120 g. Como resultado de la pirólisis se obtuvieron productos líquidos, sólidos y gaseosos. El mayor rendimiento de la fracción líquida se obtuvo a un ratio de PP/PS: 3/1, a 450°C y un tamaño de partícula de 5 – 10 mm, teniendo un total de 87,77% de líquidos. Asimismo, la composición de: parafinas, naftenos y aromáticos, mostraron valores de 27 al 44%, 26 a 27% y 29 al 47% respectivamente. Se debe tomar en consideración que el mayor contenido de PP en la alimentación propició un mayor rendimiento de parafinas. Análogamente el mayor contenido de PS propició un mayor rendimiento de aromáticos. Sin embargo, se observó que los naftenos no presentan una dependencia directa con respecto al contenido de PP y/o PS presentes en la materia prima.

Palabras clave: PIRÓLISIS, REACTOR SEMICONTINUO, ANÁLISIS PNA, PLASTIC WASTE

ABSTRACT

The purpose of this research work is the evaluation of the performance and composition of the liquid fraction obtained through a thermal pyrolysis process, in which combinations of different percentages of polypropylene (PP) and polystyrene (PS) were used as raw material. The independent variables used were: temperatures of 415 and 450 °C, PP/PS feeding ratios: 3/1 and 1/3, and particle sizes of 5-10 mm and 20-24 mm. The pyrolysis process was carried out in a semi-continuous reactor to which nitrogen gas was added in order to create a neutral atmosphere typical of the pyrolysis process. The amount of raw material sample that entered the reactor in each experience was 120 g. As a result of pyrolysis, liquid, solid and gaseous products were obtained. The highest yield of the liquid fraction was obtained at a PP/PS ratio: 3/1, at 450°C and a particle size of 5 – 10 mm, having a total of 87.77% liquids. Likewise, the composition of: paraffins, naphthenes and aromatics, showed values of 27 to 44%, 26 to 27% and 29 to 47% respectively. It should be taken into consideration that the higher content of PP in the feed led to a higher yield of paraffins. Similarly, the higher content of PS led to a higher yield of aromatics. However, it was observed that the naphthenes do not present a direct dependence with respect to the content of PP and/or PS present in the raw material.

Keywords: PYROLYSIS, SEMI-CONTINUOUS REACTOR, ANALYSIS PNA,
RESIDUOS PLÁSTICOS

INTRODUCCIÓN

La presente investigación busca una alternativa de reciclaje para los residuos plásticos de los envases desechables (vasos, tapas, táper de comida, etc.) mediante el uso de un proceso de degradación térmica denominado pirólisis, del cual se obtendrá: gases pirolíticos, líquidos pirolíticos y carbón; siendo el principal enfoque del trabajo de investigación, la evaluación del rendimiento de productos líquidos para el proceso de pirólisis de residuos plásticos de poliestireno (PS) y polipropileno (PP) y su respectiva caracterización.

Desde el punto de vista de Bulege (2013) en el mundo el crecimiento demográfico es la principal fuerza impulsora de la contaminación ambiental, por su influencia en la geografía, materias primas, productos terminados, energía y demás. Teniendo en cuenta el informe Global Plastics Outlook (2022) “Los desechos plásticos se han más que duplicado, de 156 millones de toneladas en 2000 a 353 millones de toneladas en 2019”.

En la actualidad la cantidad de residuos sólidos urbanos se ha diversificado de acuerdo con el nivel de desarrollo de cada país. Los países desarrollados en su mayoría producen mayor cantidad de residuos plásticos y los países en vías de desarrollo producen menor cantidad de residuos plásticos; para una mejor cuantificación del consumo de plásticos, organizaciones internacionales se encargan de reportar anualmente.

Actualmente en el Perú no se cuenta con una planta de pirólisis que permita tratar la gran cantidad de residuos plásticos generados. Como parte del proceso de ingeniería de detalle se necesitan plantas piloto para cálculos de escalamiento; el presente trabajo aportará información sobre un ratio de alimentación de residuos plásticos (PP, PS), temperatura de operación y tamaño de partícula enfocado en el mayor rendimiento de líquidos pirolíticos.

CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1. GENERALIDADES

1.1. Planteamiento del problema

Descripción de la realidad del problema

Como lo hace notar el informe Global Plastics Outlook (2022) la producción per cápita anual media de residuos plásticos es de: 221 kg en EEUU, 114 kg en los países europeos y 69 kg en Japón y Corea; también se señala que la composición de estos residuos plásticos en el 2019 a nivel mundial fue de: 9% reciclado, 19% incinerado, 50% va a relleno sanitario y 22% no se recoge y/o no se conoce su disposición final; siendo esta la realidad a nivel mundial.

En el Perú, según el informe anual del MINAM (2012) , los residuos sólidos generados tienen una composición de 50.9% de materia orgánica, 10.1% de plástico, 8.5% de residuos peligrosos, 7.1% de material inerte, 4.8% de papel, 3.4% de madera y restos de jardín, 3.3% de cartón, 3.2% de vidrio, 2.8% de metales, 1.8% de telas y textiles, 1.6% de caucho y cuero, 0.8% de huesos, 0.6% de tetra pack; además, de 0.45% de aparatos eléctricos y electrónicos.

En la región del Cusco, según SINIA (2021) la generación de residuos sólidos municipales diaria en el 2021 fue de 646.64 toneladas/día. Teniendo en cuenta que los residuos plásticos son aproximadamente el 10.1% de los residuos sólidos totales, se estimó una producción diaria de plásticos de 65.31 toneladas/día en el 2021; esta cantidad irá en aumento con el pasar de los años.

Asimismo, según el reporte Global Plastics Outlook (2022) el destino final de los residuos plásticos depende de las capacidades y regulaciones locales de gestión de residuos. En tal sentido, de acuerdo con data del INEI (2021) el principal destino de los residuos sólidos recolectados por las 112 Municipalidades que conforman el departamento del Cusco son los

botaderos; el destino final de residuos sólidos recolectados es: 61% botaderos, 24% reciclaje, 7% relleno sanitario, 4% quemados, 4% compostaje, planta de tratamiento y celda transitoria.

Por lo expuesto anteriormente, se hace de vital importancia buscar alternativas para el reciclaje de residuos plásticos. En tal sentido, el proceso de pirólisis aparece como una alternativa para el tratamiento de diferentes tipos de plásticos para convertirlos en componentes aprovechables tales como gas, aceites, ceras, entre otros. En línea a lo indicado, en el presente trabajo de tesis, se evaluará experimentalmente la obtención de hidrocarburos líquidos por medio de la pirólisis térmica y su caracterización respectiva, usando como materias primas la mezcla de residuos plásticos de Polipropileno (PP) y Poliestireno (PS) disponibles y de uso cotidiano en la ciudad del Cusco.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cuál es el rendimiento de producción de líquidos y composición obtenidos por manipulación de parámetros físicos de operación de una pirólisis térmica en un reactor semicontinuo, utilizando mezcla de residuos plásticos de Polipropileno (PP) y Poliestireno (PS)?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es el efecto del ratio de mezcla PP/PS de la alimentación en el rendimiento de los líquidos pirolíticos?
- ¿Cuál es el efecto del tamaño de partícula en el rendimiento de los líquidos pirolíticos?
- ¿Cuál es el efecto de la temperatura en el rendimiento de los líquidos pirolíticos?

- ¿Cuál es el efecto del ratio de PP/PS sobre el contenido final de parafinas en los líquidos?

1.3. Justificación

El presente proyecto de investigación tiene una gran importancia para la ciudad del Cusco por ser una alternativa para el reciclaje de residuos plásticos permitiendo disminuir la cantidad de plástico que se envía a los botaderos de basura u otros sistemas de gestión de residuos sólidos. El reactor experimental adaptado es semi continuo, este modelo permitirá evaluar el rendimiento de los productos de la pirólisis térmica.

A continuación, se presenta la justificación social, ambiental y técnica

1.3.1. Justificación social

Se justifica socialmente debido a que según Mamani (2022) los pobladores de la zona y comuneros de la asociación de pequeños agricultores “Haqira grande” el 8 de febrero del 2022, cerraron la vía de acceso al botadero, y protestaron por la contaminación y mal olor de la zona que soportan y por el incumplimiento del traslado del botadero de Haqira. Esto implicó que en la ciudad del Cusco; las municipalidades distritales suspendan temporalmente el servicio de recojo de basura hasta tener una solución con los pobladores de Haqira.

Actualmente el botadero de Haqira se encuentra en etapa de cierre, etapa donde se comienza a botar menor cantidad de basura por día, para así terminar las labores de cierre del botadero. La ciudad del Cusco muestra una falta de conciencia socio-ambiental por parte de sus ciudadanos, mostrando una elevada producción de basura la cual no es acorde para un botadero en cierre, y además de una falta de compromiso social para permitir la construcción de un nuevo

relleno sanitario para la ciudad del Cusco; de acuerdo con (Mamani, 2022) el cierre definitivo de Haqira será el 2026.

1.3.2. Justificación ambiental

El plástico es un material que tarda prolongados periodos de tiempo en descomponerse y dependiendo del tipo de plástico tarda entre 100 y 1000 años en degradarse. Uno de los impactos más preocupantes, de acuerdo con el reporte Global Plastics Outlook (2022) es el grueso de contaminación por plásticos viene de la recolección y eliminación inadecuada de residuos plásticos, entre estos se tienen los macro plásticos (polímeros sintéticos grandes) y micro plásticos (polímeros sintéticos de menos de 5 mm en diámetro).

Desde la posición de Ryberg, Hauschild, Wang, Averous-Monnery, & Laurent (2019), los residuos plásticos urbanos son los que más rápido se pierden en el medio ambiente. En el 2015 las pérdidas cuantificadas eran de 9.2 millones de toneladas distribuidas en un 67% de macro plásticos y 33% de micro plásticos. En el caso de América latina y el Caribe sus mayores pérdidas están en los macro plásticos; los cuales están conformados por 23% otros plásticos, 19% PP, 15% LDPE, 11% HDPE, 11% PA fibras, 8% PP fibras, 7% PET, 5% PVC.

1.3.3. Justificación técnica

Según Solis & Silveira (2020) para los residuos plásticos municipales heterogéneos; el reciclaje químico tiene identificadas tecnologías de reciclaje químico (categorizada de acuerdo a tres parámetros: temperatura de proceso, sensibilidad a la contaminación de la materia y nivel de descomposición del polímero); siendo las tecnologías de interés: craqueo térmico (pirólisis convencional) y gasificación.

De acuerdo con (Demirbas, 2004) en la pirólisis térmica las cadenas de hidrocarburos pequeñas (C2 – C4) tienen mayor presencia a mayor temperatura y los hidrocarburos medianos (C5 -C9) disminuyen a temperaturas altas; además, como afirma Solis & Silveira (2020) , “los parámetros que afectan los productos finales de la pirólisis térmica son la temperatura, la presión, el tiempo de residencia, la introducción de catalizadores y la velocidad de calentamiento.”

En la actualidad la pirólisis térmica es una tecnología que escaló a escala comercial, y ya hay instalaciones que trabajan la pirólisis térmica, estos procesos según Solis & Silveira (2020) son: PYROPLEQ, Akzo Nobel, Pka-Kiene, Siemens – KWU, DBA process, Kobe Steel; estos procesos informan sus condiciones de operación (temperaturas de trabajo y tipo de alimentación, y demás); además hay otras empresas que no permiten el acceso a esta información.

Para la aplicación de la pirólisis térmica en residuos plásticos urbanos en la ciudad del Cusco se necesita una composición de alimentación definida, temperatura de proceso, presión de proceso, tiempo de residencia y velocidad de calentamiento. Esto con el fin de obtener un buen rendimiento líquidos pirolíticos que puedan cubrir los costos operativos de la planta y generar rentabilidad.

1.4.Objetivos

1.4.1. Objetivo general

- Evaluar el rendimiento de producción y composición de líquidos obtenidos por manipulación de parámetros físicos de operación de una pirólisis térmica en un reactor semicontinuo, utilizando mezcla de residuos plásticos de Polipropileno (PP) y Poliestireno (PS).

1.4.2. Objetivos específicos

- Evaluar el efecto del ratio de mezcla PP/PS de la alimentación en el rendimiento de los líquidos pirolíticos.
- Evaluar el efecto del tamaño de partícula en el rendimiento de los líquidos pirolíticos.
- Evaluar el efecto de la temperatura en el rendimiento de los líquidos pirolíticos
- Determinar el efecto del ratio de PP/PS sobre el contenido final de parafinas en los líquidos.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

A lo largo de los años la pirólisis se ha ido consolidando como una tecnología eficaz para el reciclado de residuos plásticos, Citando a Solis & Silveira (2020) en su publicación *“Technologies For Chemical Recycling Of Household Plastics - A Technical Review And Trl Assessment”*, evaluaron las 8 tecnologías de reciclaje químico disponibles e identificaron las más adecuadas para el reciclaje de residuos plásticos domésticos, evaluadas de acuerdo a su nivel de avance tecnológico (NAT). En su investigación, la pirólisis convencional, el craqueo catalítico y la gasificación convencional; son las tecnologías con mayor nivel de preparación tecnológica porque tienen escalas de operación de nivel comercial, esto les permite aplicar al grado de plantas industriales conocida como escala comercial.

En la tabla 1 se presenta las instalaciones industriales para pirólisis de plásticos según sus condiciones de operación y productos obtenidos; la mayoría de estos proyectos se encuentran en Japón, China, Alemania y EEUU; esto es debido a que existen datos limitados y pocos proyectos de gran escala en funcionamiento.

Tabla 1*Instalaciones industriales para pirólisis de plásticos*

Proceso	Temperatura a °C	Alimentación	Rendimiento
PYROPLEQ	450-500	Residuos plásticos, Residuos municipales	Energía
Akzo Nobel	700-900	PVC rico residuos plásticos	HCL, CO, H ₂ , CH ₄
PKA-Kiener	450-500	Residuos plásticos, Residuos municipales	Gas, energía
Siemens - KWU	450-500	PE, PP, PS	65% gas, 35 % residuos sólidos
DBA process	450-500	Residuos plásticos	Energía
Kobe Steel	450-500	Residuos plásticos	Aceite y gas
Ebara	Desconocido	Residuos plásticos	Energía
Mogami-Kiko	Desconocido	PP (67), PE (33)	79% aceite, 12 % gas
Hitacho-Zosen	Desconocido	PE (55), PP (28), PS (17)	84% aceite, 10% gas, 6% sólidos
Royco Beijing	Desconocido	PE,PP,PS, aceites usados	87% aceite, 10% gas, 3% sólidos
Chiyoda Process	Desconocido	Residuos plásticos	50% aceite, 16% gas, 34% sólidos
Plastic Energy	Desconocido	Residuos plásticos	Aceite, combustibles alternativos

Nota. Tomado de (Solis & Silveira, 2020)

2.1.1. Antecedentes nacionales

El trabajo de investigación realizado por Ramos & Pretell (2021) “*Pyrolysis of expanded polystyrene waste to obtain liquid fuels*” se centró en el rendimiento de líquidos pirolíticos; los investigadores usaron un reactor horizontal tubular y una bomba de vacío, para una carga de 30 g de residuos de poliestireno expandido con dos tamaños de partícula de 0 a 5 mm y de 5 a 10 mm, y experimentado a temperaturas de pirólisis de 400 °C, 450 °C, 500 °C y 550°C; como resultados obtuvieron un máximo de líquidos de 97.8% en masa a 550 °C y tamaños de partícula de 5 a 10 mm. Como conclusión a su trabajo el tamaño de partícula tiene efecto en la cantidad de productos líquidos solo hasta los 500°C a temperaturas superiores no afecta en la cantidad de productos líquidos.

En el trabajo de investigación realizado por Vargas Vilca (2020) “*Evaluación de la pirólisis térmica y de la catalítica usando zeolita volcánica como catalizador de desechos plásticos*”, la investigación se centró en comparar la pirólisis térmica y la pirólisis catalítica de residuos plásticos de PP con zeolitas volcánicas manufacturadas a partir de la ceniza volcánica del volcán Ubinas; utilizando un horno tubular para un tubo de cuarzo y cámara de calentamiento, para una muestra de 1 g de PP, y 10 g de catalizador, y temperatura de pirólisis de 450°C; como resultados la pirólisis catalítica da como productos gaseosos como máximo 76.42% con zeolita ZSM-5, para la pirólisis térmica da como máximo 47.26% de gases. Como conclusiones se afirma que los líquidos pirolíticos disminuyen con el incremento de catalizador.

El trabajo de investigación realizado por Campos Lapa & Tenazoa Armas (2018) “*Combustibles fuel-oil obtenidos de residuos plásticos mediante pirólisis, Pucallpa - Ucayali*”, se centró en la obtención de combustibles líquidos del tipo Fuel Oil de características similares al Diesel B5; a partir de los residuos plásticos: PP, HDPE, PS; utilizando un reactor Batch de 2.5

Kg de capacidad de residuos plásticos y temperatura de trabajo de 450°C. Como resultados obtuvieron características físicas y químicas superiores al Diesel B5 para el PS; y similares para el: HDPE y PP.

2.1.2. Antecedentes internacionales

El trabajo de tesis realizado por Zambrano Bonilla (2021) “*Obtención de combustible a partir de la pirólisis térmica de mezclas de polipropileno y poliestireno reciclados*”, se centró en la obtención de combustibles líquidos a partir de residuos plásticos de: PP y PS; utilizando un reactor semicontinuo y temperaturas de trabajo de 400°C – 425°C y una alimentación de 200 g y ratios de alimentación de 1/3, 1/1 y 3/1 de la los residuos plásticos PP/PS; como resultado obtuvieron el mayor rendimiento de líquidos de 82.33% a partir del ratio 1/3 de PP/PS y una temperatura de pirólisis de 425°C.

El trabajo de investigación realizado por Rejas et al. (2015) “*Generación de combustibles líquidos a partir de residuos plásticos*”, se centró en la obtención de combustibles líquidos a partir de residuos plásticos: PET, HDPE, LDPE, PP, PS y PVC; utilizando un reactor Batch y temperaturas de trabajo menores a 300°C y una alimentación de 250 g; como resultados obtuvieron el mayor rendimiento de líquidos para el PP y PS con un 70%, para el LDPE y HDPE se obtuvo un 20%, para PET, 15%, y el PVC no fue utilizado.

El trabajo de investigación realizado por Nisar et al. (2019) “*Fuel production from waste polystyrene via pyrolysis: Kinetics and products distribution*”, se centró en la obtención de combustibles líquidos a partir de residuos de PS; utilizando un reactor ensamblado según sus criterios, en una atmósfera inerte de nitrógeno a partir de residuos plásticos de PS de 0.25 a 0.40 mm, y temperaturas de 360 a 420 °C y una alimentación de 4 g; como resultado obtuvieron el mayor rendimiento de líquidos para 410°C

El trabajo de investigación realizado por Morocho (2019) “*Obtención de combustible mediante pirólisis térmica a partir de polipropileno reciclado*” se centró en la obtención de combustibles líquidos a partir de polipropileno reciclado; utilizando un reactor batch, y temperaturas de pirólisis de 350 °C a 450 °C. Para una alimentación de 200 g de PP; como resultados obtuvieron el mayor rendimiento de líquidos de 47.23% a 375 °C. Como conclusiones se afirma que la temperatura óptima de pirólisis es a 400 °C debido a que hay mayor distribución de hidrocarburos totales.

En el trabajo de investigación realizado por López et al. (2011) “*Influence Of Time And Temperature On Pyrolysis Of Plastic Wastes In A Semi-Batch Reactor*”, se centró en estudiar la influencia de la temperatura y el tiempo para la pirólisis de residuos plásticos a partir de residuos plásticos de: PET, PP, PS, PVC y PE en proporciones de 40 wt% PE, 35 wt% PP, 18 wt% PS, 4wt%PET y 3wt% PVC; con un tamaño de granulo menor a 3 mm; utilizando un reactor semicontinuo y en condiciones de nitrógeno continuo de 1dm³/min y temperaturas de 460 a 600 °C. Como resultados obtuvieron el mayor rendimiento de líquidos de 72% a 460 °C. Como conclusiones se establece que la temperatura óptima de pirólisis es de 500 °C, respaldada por términos de conversión y calidad de líquidos pirolíticos, además de tiempos de reacción cortos de 15 a 30 min.

En el trabajo de investigación realizado por Ciliz, Ekinici, & Snape (2004) “*Pyrolysis Of Virgin And Waste Polypropylene And Its Mixtures With Waste Polyethylene And Polystyrene*”, la investigación se centró en el estudio del impacto de la relación de mezcla de alimentación de residuos plásticos de: PS, PE y PP en la pirólisis; mediante el ensayo Gray-King modificado el cual tenía un reactor de 30 mm de longitud y 20 mm de diámetro, con una muestra de 5 g; a una velocidad de calentamiento de 5 °C/min y temperatura de 600 °C. Como resultados, obtuvieron

para el PP virgen un 76% de líquidos y en los residuos de PP de 71% de líquidos. Para mezclas de PE:PP la relación 1:1 permite un equilibrio de productos obtenidos en alifáticos, poli aromáticos y mono aromáticos; y para la mezcla de PS:PP la relación 0:1 da la mayor cantidad de gases ligeros: metano, etano, etene, propano, propene, y butene; Como conclusiones se estableció que las impurezas de desechos en el Polipropileno promueven el rendimiento de gas, y el mayor contenido de PP en las mezclas PP:PS y PS:PP suprime el rendimiento de líquidos.

2.2. Marco conceptual

2.2.1. Plásticos

De acuerdo con Harper & Petrie (2004) un plástico es un polímero orgánico, disponible en alguna forma de resina o alguna forma derivada de la resina polimerizada básica. Estas formas pueden ser resinas líquidas o pastosas para incrustar, recubrir y unir con adhesivo, o pueden ser formas moldeadas, laminadas o conformadas, incluidas láminas, películas o formas a granel de mayor masa.

Los polímeros según Saldivar & Vivaldo (2013) son moléculas muy grandes, o macromoléculas, formadas por la unión de varias moléculas más pequeñas. Estas unidades más pequeñas se denominan monómeros antes de convertirse en polímeros. De hecho, la palabra “polímero” tiene un origen griego que significa “muchos miembros”. La reacción química mediante la cual se sintetizan polímeros a partir de monómeros se denomina polimerización; sin embargo, este es un término genérico, ya que hay una serie de mecanismos químicos involucrados en diferentes reacciones de polimerización.

2.2.1.1 Propiedades de los plásticos

Varían con relación al tipo de polímero que lo constituye, una apreciación de sus propiedades mecánicas y reológicas según Saldivar & Vivaldo (2013).

- A cadenas más largas y con pesos moleculares elevados imparten propiedades mecánicas únicas a los polímeros como producto terminado. Y por encima de un peso molecular mínimo se notan propiedades mecánicas incrementadas considerándose a estos polímeros como altos en peso molecular.
- Las propiedades reológicas permiten que los termoplásticos se procesen y moldeen bajo acción del calor y presión teniendo un estado de líquido no newtoniano durante el moldeo; además tienen un comportamiento de flujo viscoelástico complejo el cual les da memoria debido al componente elástico presente en los polímeros; y por último denotar la presencia de la viscosidad.

2.2.1.2. Clasificación de los plásticos

Los plásticos se clasifican de acuerdo a su respuesta termo-mecánica. Según Saldivar & Vivaldo (2013) estos se agrupan en tres categorías: elastómeros, termoestables y termoplásticos.

- **Termoplásticos.** Son materiales que pueden moldearse bajo calentamiento. Una vez que se calientan por encima de cierta temperatura, estos materiales fluyen como líquidos muy viscosos y pueden adoptar la forma de un molde; una vez que se enfrían de nuevo, mantienen la nueva forma moldeada. En términos generales, este proceso de calentamiento y moldeo puede repetirse varias veces; sin embargo, después de varios re procesamientos de este tipo, las cadenas poliméricas pueden romperse o sufrir reacciones que conducen a propiedades físicas reducidas, un hecho que establece límites prácticos a su capacidad de reciclaje de los termoplásticos. Algunos de los termoplásticos más importantes por volumen son el polietileno (polietileno de baja densidad (LDPE) y polietileno de alta densidad (HDPE)), polipropileno (PP), policloruro de vinilo (PVC) y

poliestireno (PS o PSt), por nombrar algunos pocos. Los termoplásticos se sintetizan en grandes cantidades en plantas de polimerización y luego son transformados por otros usuarios en equipos de procesamiento para formar objetos útiles en empaques o como utensilios (Saldivar & Vivaldo, 2013).

- **Termoestables.** Son polímeros formados por la mezcla y reacción química de precursores fluidos en un molde; una vez que los precursores reaccionan, se crea una red reticulada que ya no puede fluir bajo calentamiento; por lo tanto, la reacción y el moldeo en la forma final normalmente se llevan a cabo al mismo tiempo (mediante el proceso de moldeo por inyección de reacción o RIM). Ejemplos de termoestables comunes son algunos poliésteres, resinas de fenol-formaldehído, resinas epoxi y poliuretanos, entre otros (Saldivar & Vivaldo, 2013).
- **Elastómeros.** Los elastómeros o cauchos son materiales flexibles que se utilizan principalmente en llantas, mangueras y sellos; como adhesivos; o como modificadores de impacto de termoplásticos. Presentan una alta resistencia al impacto, incluso a bajas temperaturas a las que los materiales aumentan su rigidez. Para algunas de las aplicaciones (p. ej., neumáticos o mangueras), estos materiales deben entrecruzarse ligeramente una vez que adquieren la forma deseada para impartirles estabilidad dimensional, ya que de lo contrario tienden a fluir lentamente. Los elastómeros son polímeros que se utilizan por encima de su temperatura de transición vítrea (T_g). Algunos ejemplos de elastómeros comunes son el polibutadieno, que se utiliza como modificador de impacto de plásticos rígidos; SBR (copolímero de estireno y butadieno), utilizado principalmente en

neumáticos; EPDM (copolímero de etileno, propileno y un monómero dieno, normalmente norborneno); NBR (copolímero de acrilonitrilo y butadieno) (Saldivar & Vivaldo, 2013).

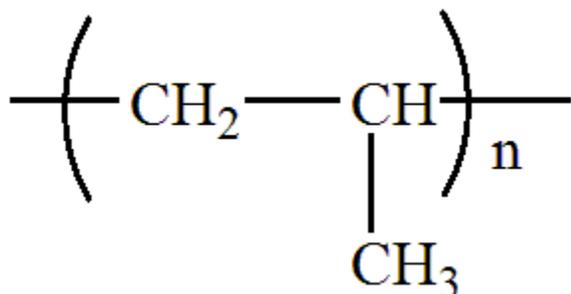
2.2.2. Polipropileno (PP)

El Polipropileno es un termoplástico que pertenece a la familia de las Poliolefinas. Se obtiene a través de la polimerización del propileno bajo condiciones controladas de calor y presión. A su vez el propileno es un subproducto gaseoso del refinado del petróleo (Maier & Calafut, 1998).

Su estructura molecular se muestra en la figura 1.

Figura 1

Estructura química del polipropileno



Nota. Tomado de (Wypych, 2016)

Los tres tipos principales de PP generalmente disponibles de acuerdo con McKeen (2016) son los siguientes:

- Los homopolímeros se fabrican en un solo reactor con propileno y catalizador. Son los más rígidos de los tres tipos de propileno y tienen la mayor resistencia a la tracción en el producto terminado. En estado natural (sin colorantes añadidos) son translúcidos y tienen una

excelente transparencia o claridad al contacto con líquidos. En comparación con los otros dos tipos, tienen menos resistencia al impacto, especialmente por debajo de 0 °C.

- Los copolímeros aleatorios (copolímero homofásico) se fabrican en un solo reactor con una pequeña cantidad de etileno (<5 %) añadida que altera la cristalinidad del polímero, lo que permite que este tipo sea el más claro. También son los más flexibles con la resistencia a la tracción más baja de los tres. Tienen mejor impacto a temperatura ambiente que el homopolímero, pero comparten la misma resistencia al impacto relativamente pobre a bajas temperaturas.

- Los copolímeros de impacto (copolímero heterofásico), también conocidos como copolímeros de bloque, se fabrican en un sistema de dos reactores en el que la matriz del homopolímero se fabrica en el primer reactor y luego se transfiere al segundo reactor donde se polimerizan el etileno y el propileno para crear etileno-propileno caucho (EPR) en forma de nódulos microscópicos dispersos en la fase de matriz de homopolímero. Estos nódulos imparten al compuesto resistencia al impacto tanto a temperatura ambiente como a temperatura fría. Este tipo tiene rigidez y resistencia a la tracción intermedias y es bastante turbio. En general, cuanto más monómero de etileno se añade, mayor es la resistencia al impacto con una rigidez y una resistencia a la tracción correspondientemente menores.

También son comunes las películas de PP orientadas y multicapa.

2.2.2.1. Propiedades físicas

En la Tabla 2, se observa las propiedades físicas del PP puro y sus variantes comerciales.

Tabla 2*Propiedades físicas del polipropileno*

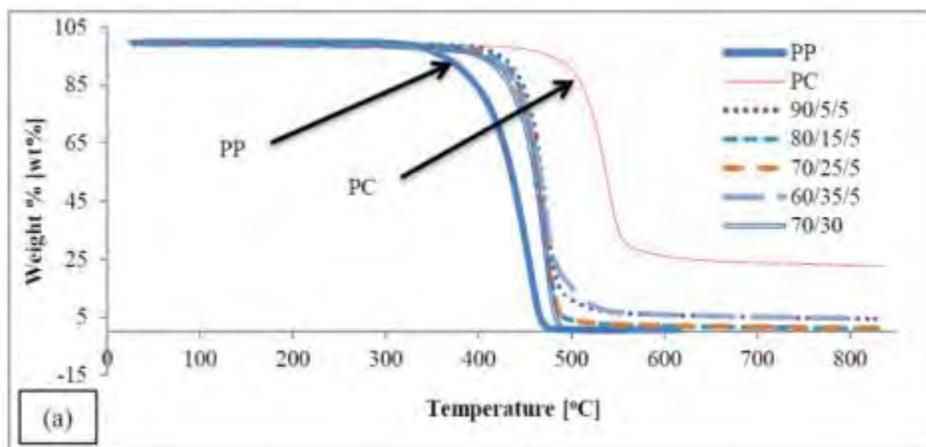
Parámetro	Unidad	Valor
Densidad a 20°C	g/cm ³	0.84 - 0.91
Densidad aparente a 20°C	g/cm ³	
Color		Translúcida a blanca a blanquecina
Índice de refracción a 20°C		1.49 - 1.51
Polarizabilidad molar	cm ³ x 10e ⁻²⁵	6.1313
Bruma	%	14
Brillo, 60°, Gardner (ASTM D523)	%	34 – 52
Olor		puede tener un olor acre
Temperatura de fusión	°C	120 - 176; 147 - 158(metaloceno); 160 - 176 (monociclinic); 140 - 153 (hexagonal)
Punto de ablandamiento	°C	155 – 161
Temperatura de inicio de la descomposición	°C	328

Nota. Tomado de (Wypych, 2016)

2.2.2.2. Descomposición térmica del polipropileno (PP)

Según Mat-Shayuti, Abdullah, & Megat-Yusoff (2016), quienes investigaron el efecto del policarbonato en polipropileno, realizaron un análisis termogravimétrico (TGA) del polipropileno.

Como se puede ver en la figura 2, el polipropileno tiene una temperatura de descomposición inicial, máxima y final de 283, 455 y 483 °C respectivamente.

Figura 2*TGA del PP comercial*

Nota. Tomado de (Mat-Shayuti et al., 2016)

2.2.2.3. Aplicaciones del polipropileno (PP)

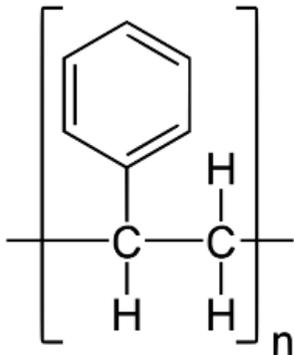
Aplicaciones de uso general: Bisagras de plástico, capacitores de RF, recipientes de alimentos, cubos de plástico, baterías de automóviles, cestos de basura, botellas de prescripción farmacéutica, recipientes enfriadores, platos y jarras, alfombras, tapetes y tapetes, y cuerdas.

2.2.3. Poliestireno (PS)

El poliestireno sólido puro es un plástico duro e incoloro con flexibilidad limitada (McKeen, 2016). El PS es el plástico más simple basado en estireno. Su estructura se muestra en la Figura 3.

Figura 3

Estructura química del Poliestireno



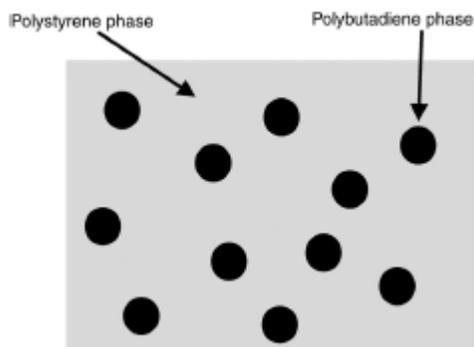
Nota. Tomado de (McKeen, 2016)

Las tres formas generales de PS son las siguientes:

- PS de propósito general.
- PS de alto impacto.
- PS sindiotáctico.

Uno de los plásticos más importantes es el HIPS. Esta es una matriz de PS que está incrustada con un modificador de impacto, que es básicamente un polímero similar al caucho, como el polibutadieno.

En la Figura 4 se muestra la estructura del poliestireno del alto impacto.

Figura 4*Estructura del Poliestireno de alto impacto**Nota.* Tomado de (McKeen, 2016)**2.2.3.1. Propiedades físicas**

En la Tabla 3, se observa las propiedades físicas del PS puro y sus variantes comerciales.

Tabla 3*Propiedades físicas del Poliestireno*

Parámetro	Unidad	Valor
Densidad a 20 °C	g/cm ³	1.04 - 1.06; 1.02 - 1.03 (impacto modificado); 0.936 (fundir)
Densidad aparente a 20 °C	g cm ³	0.6
Color		blanca
Índice de refracción a 20 °C		calculado=1.603-1.6037; experimental. =1.5894-1.600
Transmitancia	%	89-90
Bruma	%	14
Brillo, 60o, Gardner (ASTM D523)	%	80 - 95
Olor		inodora
Temperatura de fusión	°C	275
Punto de ablandamiento	°C	74
Temperatura de inicio de la descomposición	°C	285

Nota. Tomado de (Wypych, 2016)

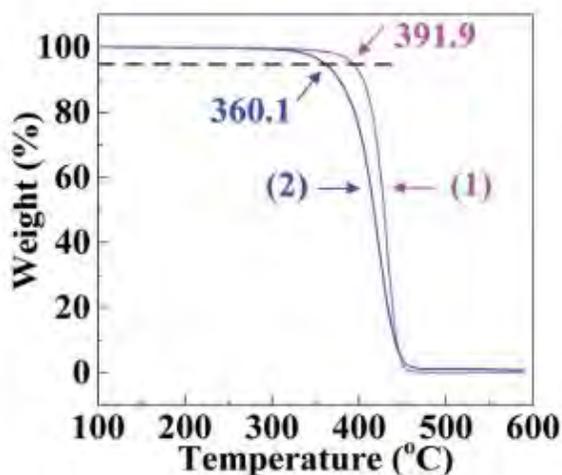
2.2.3.2. Descomposición térmica del poliestireno (PS)

En la investigación realizada por Wang et al. (2019), se compararon diferentes propiedades del poliestireno comercial y el poliestireno modificado (SGA). Para ello, los autores realizaron diferentes técnicas entre las que se encuentra el análisis termogravimétrico.

Como se puede ver en la figura 5, el poliestireno comercial (1) tiene una temperatura de inicio de descomposición de 391.9 °C, en cambio que para el poliestireno comercial modificado (2) esta temperatura de descomposición empieza en los 360.1 °C; mostrándose un igual punto final de temperatura de descomposición de 440 °C.

Figura 5

TGA del PS de Alto Impacto Comercial y Modificado



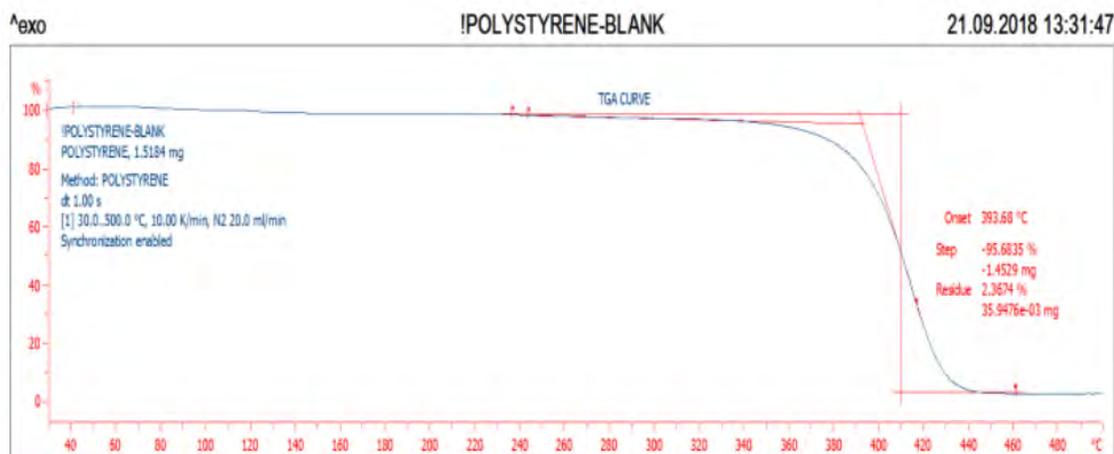
Nota. Tomado de (Wang et al., 2019)

Por otro lado, (Rawi, Suhaimi, & Jaapar, 2018), realizaron la caracterización de residuos de poliestireno obtenidos de residuos de embalaje de espuma.

Como se puede ver en la figura 6, la espuma de poliestireno tiene una temperatura de inicio de descomposición de 335 °C; mostrándose un punto final de temperatura de descomposición de 450 °C.

Figura 6

TGA de la Espuma de Poliestireno



Nota. Tomado de (Rawi et al., 2018)

2.2.3.3. Aplicaciones del poliestireno (PS)

El uso más destacado del PS es como poliestireno expandido (EPS). El EPS se produce a partir de una mezcla de aproximadamente un 5 a un 10 % de agente espumante gaseoso (por lo general, pentano o dióxido de carbono) y un 90 a un 95 % de PS (p/p). Las perlas de plástico sólidas se expanden en espuma mediante el uso de calor (generalmente vapor). El calentamiento se lleva a cabo en un recipiente grande con capacidad para 200–2000 L. Se utiliza un agitador para evitar que las perlas se fusionen. Las perlas expandidas son más ligeras que las perlas no expandidas, por lo que se fuerzan hacia la parte superior del recipiente y se retiran.

Este proceso de expansión reduce la densidad de las perlas al 3% de su valor original y produce una estructura de celdas cerradas de piel suave. Posterior a esto, las perlas pre expandidas generalmente se "envejecen" durante al menos 24 h en silos de almacenamiento de malla. Esto permite que el aire se difunda en las perlas, enfriándose y haciéndolas más duras. Estos gránulos expandidos son excelentes para el moldeado detallado. El poliestireno extruido (XPS), que es diferente del EPS, se conoce comúnmente con el nombre comercial Styrofoam™.

Es económico y se utiliza para producir kits de ensamblaje de modelos de plástico, cubiertos de plástico, estuches de CD y muchos otros objetos donde se desea un plástico económico bastante rígido.

Aplicaciones de uso general: Yogur, nata, mantequilla, bandejas de carne, cartones de huevos, bandejas de frutas y verduras, así como pasteles, croissants y galletas, envases médicos y desechables, envases de panadería y electrodomésticos grandes y pequeños, especialmente cuando se requiere claridad.

Aplicaciones de alto impacto: accesorios de refrigeración, pequeños electrodomésticos, equipos eléctricos para césped y jardín, juguetes y controles remotos.

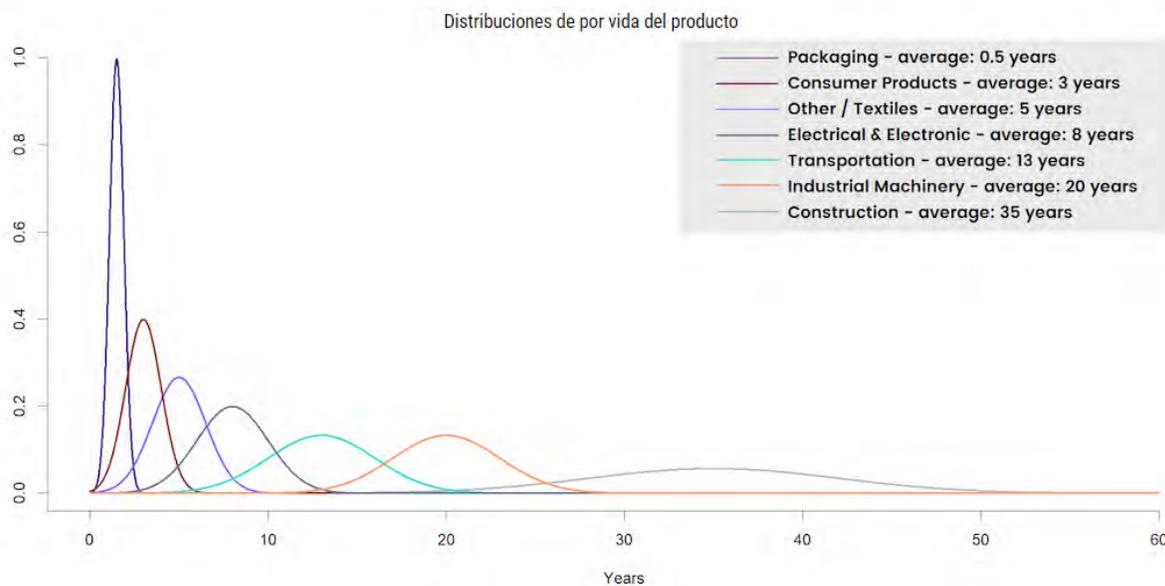
2.2.4. Residuos plásticos

Según el informe Global Plastics Outlook (2022) la generación de residuos plásticos urbanos se debe a la forma de utilización de los plásticos. Notando que entre más corta sea la vida útil del plástico, más rápido será un residuo plástico generado.

Como se puede ver en la figura 7, el plástico más consumido y con menor vida útil son los de envases desechables (bolsas, táper de comida, etc.) que son elaborados a partir de PP, LDPE y HDPE, PS.

Figura 7

Distribución de vida útil de los plásticos según segmento de uso



Nota. Tomado de (Geyer, Jambeck, & Law, 2017)

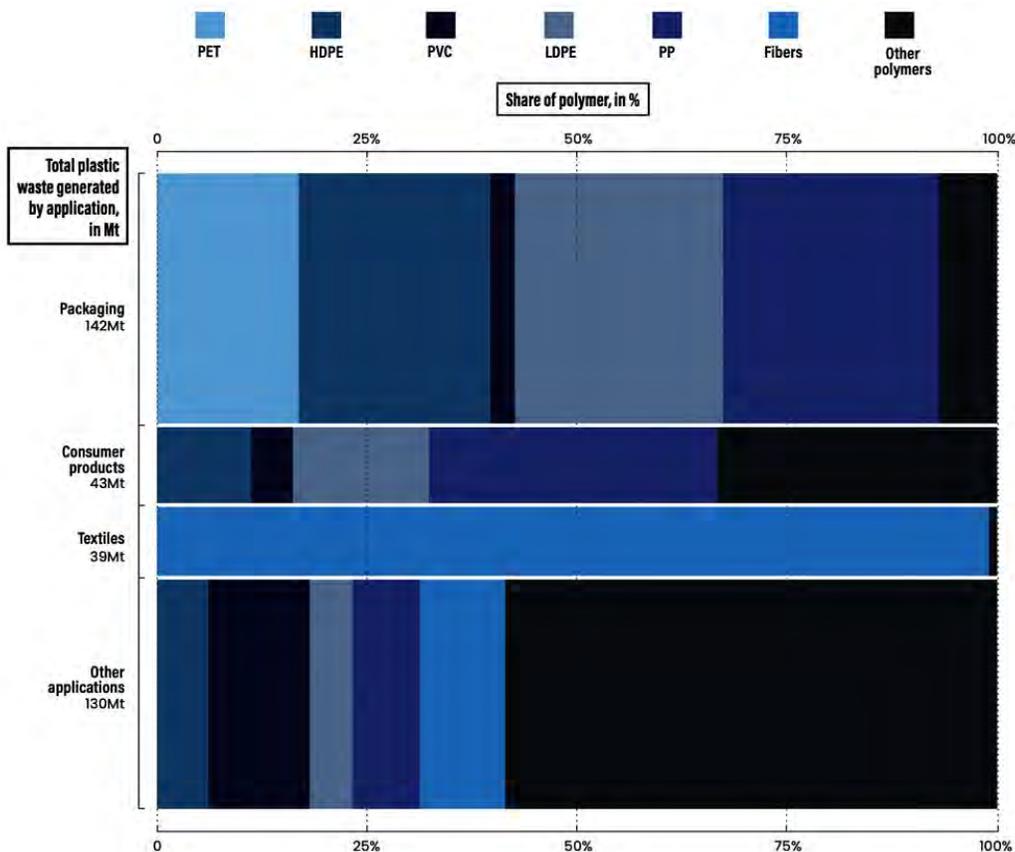
2.2.6.1. Factores en la generación de desechos plásticos

Además, como lo hace notar Global Plastics Outlook (2022) cuando se botan los residuos sólidos urbanos hay factores como: forma dimensional, tamaño de objeto, tipo de polímero, mezcla de aditivos y demás; que facilitan su reciclaje y/o su pérdida en el medio ambiente.

Como se puede ver en la figura 8, dos tercios de los residuos plásticos urbanos producidos provienen de productos de embalaje y envases desechables.

Figura 8

Desechos plásticos de productos de vida relativamente corta



Nota. El gráfico muestra los residuos plásticos generados en 2019 en millones de toneladas, Tomado de (*Global Plastics Outlook, 2022*).

2.2.5. Pirólisis térmica

Pirólisis convencional

La pirólisis térmica es la degradación térmica de los plásticos en una atmósfera inerte produciendo gas, petróleo y productos carbonizados sólidos (Onwudili et al., 2009); de acuerdo con Solis & Silveira (2020) la pirólisis convencional es una tecnología adecuada para tratar residuos plásticos difíciles de despolimerizar, como; por ejemplo, los envases de plástico multicapa. La pirólisis ocurre a temperaturas de entre 300 – 700 °C y en ausencia de oxígeno;

además la pirólisis convencional permite cambiar los parámetros de proceso para optimizar el rendimiento del producto deseado (líquidos o gases pirolíticos). Las principales dificultades ocurridas durante la pirólisis convencional son la complejidad de las reacciones y la cantidad de energía requerida en el proceso.

2.2.7.1. Tecnologías de pirólisis convencional

Se tienen 2 tipos:

Pirólisis de plasma. De acuerdo con Solis & Silveira (2020) en la pirólisis de plasma se añade las propiedades termoquímicas del plasma para producir gas de síntesis a partir de desechos plásticos; trabajando en temperaturas de 1730 y 9730 °C. Este proceso es muy rápido durando como máximo 0.5 segundos. Sus principales ventajas son la descomposición total del polímero, y produciendo un gas de pirólisis con alto poder calorífico.

Pirólisis asistida por microondas. De acuerdo con Solis & Silveira (2020) la pirólisis asistida por microondas trabaja a temperaturas más altas que la pirólisis convencional, en esta pirólisis por microondas se mezcla un material dieléctrico altamente absorbente de microondas por donde el calor será transferido a los plásticos por conducción; sus principales ventajas son temperaturas y velocidades de calentamiento muy rápidas permitiendo alcanzar altas eficiencias de conversión de la energía eléctrica en calor.

También permite realizar un calentamiento selectivo de los materiales, teniendo como factor predominante la rigidez dieléctrica del material para establecer la magnitud de calentamiento.

2.2.7.2. Productos de la pirólisis

De acuerdo con el trabajo de investigación de Fakhrhoseini & Dastanian (2013) en la reacción de pirólisis térmica se producen 3 fases: sólido (Carbón), líquido (Alquitrán) y gas; siendo esas tres fases inmiscibles espontáneamente.

Aceite de pirólisis

El aceite pirolítico es el producto principal de la pirólisis de desechos plásticos y tiene un poder calorífico cercano al combustible comercial de gasolina y diésel. Además Fernandez et al. (2011) mencionan más usos industriales:

- Combustible de combustión.
- Utilizado para la generación de energía.
- Producción de productos químicos y resinas.
- Combustible para el transporte.
- Producción de anhidro-azúcares como levoglucosan.
- Como aglomerante para peletizar y formar briquetas de materiales de desecho orgánicos combustibles.
- El bio aceite puede usarse como conservantes, por ejemplo, conservantes de madera,
- Una mezcla adecuada de un líquido de pirólisis con el aceite diésel puede usarse como combustibles para motores diésel.

Además, el aceite puede almacenarse y transportarse y, por tanto, no es necesario utilizarlo en el lugar de producción.

Carbón

Según Anuar Sharuddin et al., (2016) la velocidad de calentamiento lenta a muy baja temperatura y el tiempo de residencia prolongado maximizan la formación de carbón en el proceso de pirólisis.

Dicho con palabras de Fernandez et al., (2011) el carbón obtenido de la pirólisis es carbón elemental procedente de la descomposición térmica de compuestos orgánicos, como afirma Anuar Sharuddin et al. (2016) “principalmente en materia orgánica hasta un 98.9% en peso.”

Además (Fernandez et al., 2011) menciona más usos industriales:

- Como combustible sólido para calderas que puede convertirse directamente en pellets o mezclarse con otros materiales como biomasa, carbón, etc., para formar los mismos.
- Como materia prima para la producción de carbón activado.
- Como materia prima para fabricar nano filamentos de carbono.
- Como materia prima para el proceso de gasificación para obtener gas rico en hidrógeno.
- Como materia prima para producir catalizadores de área superficial alta para su uso en condensadores electroquímicos.

Gas

Según Basu (2013), la temperatura alta y el tiempo de residencia prolongado son las mejores condiciones para maximizar la producción de gas en el proceso de pirólisis.

Como señala (Fernandez et al., 2011), el gas producido a partir de la pirólisis se puede utilizar directamente como combustible en diversas aplicaciones energéticas, tales como:

- Combustión directa en calderas sin necesidad de tratamiento de gases de combustión.
- En turbinas/motores de gas asociados a la generación de electricidad.

2.2.7.3. Parámetros del proceso de pirólisis convencional

En el pirólisis convencional los parámetros de operación permiten la optimización de productos a obtener y su composición. Estos parámetros son:

Composición del material a pirolizar

Es el factor con mayor influencia, ya que el rango de hidrocarburos a obtener depende del tipo de polímero, propiedades de estructura molecular, interacción con otros polímeros en casos de mezclas.

Temperatura

De acuerdo con Anuar Sharuddin et al. (2016) la temperatura es uno de los parámetros determinantes del rendimiento de productos, porque controla la reacción de craqueo de la cadena polimérica. Según (Solis & Silveira, 2020) el rango de temperaturas mayormente trabajadas es de 300°C a 700°C, para la pirólisis comercial.

En la pirólisis de PS, Según Onwudili et al. (2009) a 300 °C no se ven reacciones visibles, a 350 °C el PS se degrada por completo a aceite oscuro viscoso, de 400 a 425 °C empieza a crecer la producción de carbón y gas hasta llegar a los 500 °C donde el carbón acumulado es de 30.4% en peso; quedando demostrado la existencia de una relación entre las cantidades de productos carbonizados y el aceite de pirólisis.

Para el caso del PP, según Ahmad et al. (2015), a temperaturas de 250 °C a 400 °C se consigue un rendimiento de 69.82% de líquidos en peso y por otro lado, según Fakhrhoseini & Dastanian (2013), a 500 °C se obtiene 82.12% de líquidos en peso a una velocidad de calentamiento de 6 °C/min. Por otro lado, Sakata et al. (1999) obtuvieron un rendimiento de líquidos de 69.3% y 80.1% a 380°C y 430°C respectivamente. Estas variaciones del rendimiento de líquidos dan a informar que el control de temperaturas dentro del reactor debe ser mejor supervisada por la gran variabilidad de rendimientos de líquidos.

Velocidad de calentamiento

De acuerdo con Chin et al. (2014), la velocidad de calentamiento altas aceleran la pérdida de peso, y por ende aumenta la velocidad de reacción. La velocidad de calentamiento estudiada por la mayoría de investigadores están en el rango de 5 °C a 20 °C por min, además por temas de rentabilidad se recomienda trabajar a 10 °C/min como velocidad de calentamiento.

Tiempo de residencia

Según Mastral et al. (2002), “el tiempo de residencia se puede definir como la cantidad promedio de tiempo que la partícula pasa en el reactor y puede influir en la distribución del producto”. A mayor tiempo de residencia se obtendrán productos más estables térmicamente.

Los tiempos de residencia estudiados por la mayoría de investigadores están en el rango de 0 a 180 min, además por temas de rentabilidad se recomienda trabajar de 0 a 60 min como tiempo de residencia.

Presión

La mayoría de las investigaciones sobre pirólisis convencional se realizaron a presión atmosférica. Sin embargo, Onwudili et al. (2009) trabajó a 0.3 MPa como presión inicial con

barrido de nitrógeno, la pirólisis de PS fue desarrollada en el rango de presiones de acuerdo a la temperatura elegida en el caso de 300 °C a 500 °C se obtuvieron presiones de 0.31 a 1.6 MPa.

Tamaño de partícula

El tamaño de partícula se considera un factor que influye en la transmisión de calor al material, Según Liu, Fu, Liu, Zhang, & Li (2022), el tamaño de partícula de calentamiento estudiados por la mayoría de investigadores están en el rango de 1 mm² a 25 mm².

Cantidad de muestra

Este parámetro, al igual que el tamaño de partícula, incide de mayor forma en la transferencia de calor dentro del reactor y en menor medida en los mecanismos químicos. La cantidad de muestra se determina principalmente por dos factores: el material a pirolizar y el tipo de reactor a utilizar (Conesa, 1996).

Atmósfera de reacción

De acuerdo con (Conesa, 1996), para propiciar el ambiente idóneo para la pirólisis, comúnmente se emplean gases inertes como el nitrógeno o el helio (N₂, He). Otros investigadores también suelen trabajar a presiones de vacío, según (Ramos & Pretell, 2021) una presión de vacío comúnmente trabajada es a 34.66 KPa .

2.2.7.4. Tipo de reactor para pirólisis

De acuerdo con Anuar Sharuddin et al. (2016), el tipo de reactores tiene un impacto importante en la mezcla de los plásticos y catalizadores, el tiempo de residencia, la transferencia de calor y la eficiencia de la reacción para lograr el producto final deseado.

Reactor semicontinuo. Un reactor semicontinuo es un reactor que permite adicionar reactivos y eliminar los productos al mismo tiempo. En los reactores semicontinuos normalmente

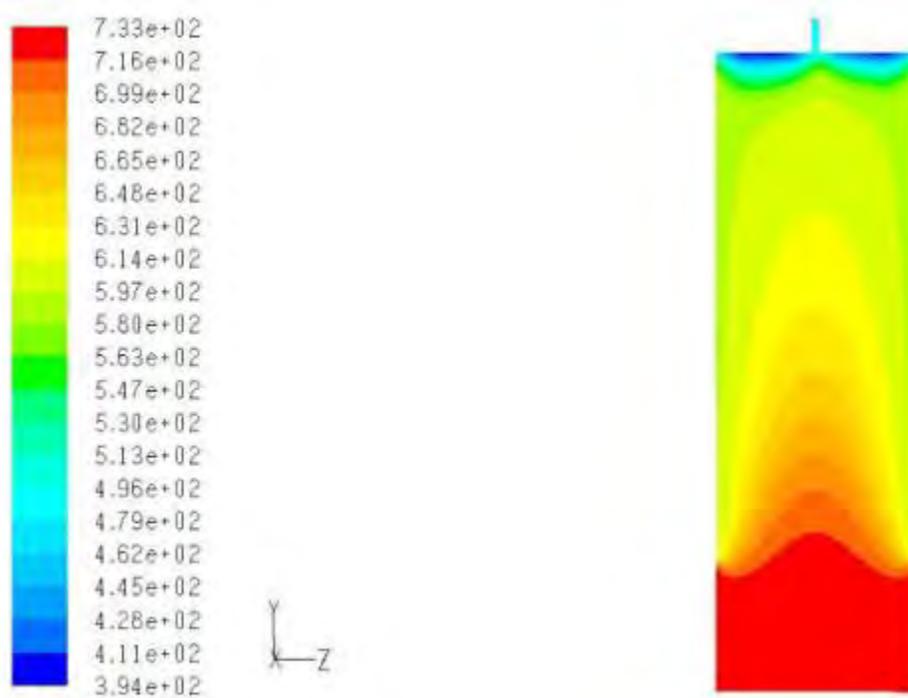
se trabaja en temperaturas de 300 a 800 °C para procesos de pirólisis térmica y catalíticas, con la facilidad de controlar parámetros para obtener un alto rendimiento de líquidos, esto lo vuelve como uno de los mejores reactores para la pirólisis térmica.

De acuerdo al trabajo de Hartulistiyoso et al. (2015) para entender la distribución de temperaturas dentro del reactor semicontinuo, para el proceso de pirólisis; se debe a la acumulación de líquido en el fondo y así mismo la calor a lo largo del eje radial.

En la figura 9, se muestra el eje radial para una pirólisis a 450°C

Figura 9

Contorno y valor de la temperatura dentro del reactor semicontinuo



Nota. Tomado de Hartulistiyoso et al. (2015)

2.2.6. Caracterización de una fracción de petróleo

En esta sección se discuten los parámetros de caracterización que normalmente se miden en el laboratorio, así como los métodos para sus mediciones. Por lo general, no todos estos parámetros se reportan en un informe de laboratorio, sin embargo, todas las demás propiedades básicas de la fracción líquida se pueden determinar a partir de métodos predictivos a menos que algunas propiedades sean ya conocidas.

2.2.8.1. Punto de ebullición y curva de destilación

Según Riazi (2005), para una fracción de petróleo de composición desconocida, el punto de ebullición puede presentarse mediante una curva de temperatura versus % en volumen (o fracción) de mezcla vaporizada. Las curvas indican la temperatura de vaporización después de una cierta cantidad de mezcla líquida vaporizada en base a 100 unidades de volumen. El punto de ebullición del componente más liviano en una mezcla de petróleo se denomina punto de ebullición inicial (IBP) y el punto de ebullición del compuesto más pesado se denomina punto de ebullición final (FBP).

En la tabla 4, se presenta las fracciones de petróleo crudo recuperables según sus puntos de ebullición.

Tabla 4*Intervalos de ebullición de fracciones típicas de petróleo crudo*

Producto	Rango de ebullición °C	
Ligero y butanos	< 30	
Mezcla de gasolinas	30	85
Nafta	85	177
Kerosene, Jet Fuel	177	233
Diesel, aceites	233	344
Gasóleo pesado (AGO)	344	566
Residual	566	+

Tomado de Abdel-Aal et al., (2015)

Al ser procesado el crudo en una unidad de destilación primaria las fracciones de crudo de petróleo tomaran el nombre de producto con especificaciones ASTM para cada producto.

Tabla 5*Principales productos de la destilación atmosférica de crudo*

Corte	Rango de destilación ASTM (°C)
Nafta ligera de destilación directa (LSR)	32 – 104
Nafta pesada de destilación directa (HSR)	82 - 204
Kerosene	166 – 282
Gasóleo ligero (LGO)	216 – 338
Gasóleo atmosférico (AGO)	288 – 443

Tomado de Liu et al. (2018)

2.2.8.1.1. ASTM D86

Según Riazi (2005), La norma ASTM D86 es uno de los métodos más simples y antiguos para medir e informar los puntos de ebullición de fracciones de petróleo y se aplica principalmente a productos como naftas, gasolinas, queroseno, gasóleos y otros productos

derivados del petróleo similares. sin embargo, esta prueba no se puede realizar para mezclas que contengan gases muy ligeros o compuestos muy pesados que no se puedan vaporizar.

2.2.8.1.2. ASTM TBP

Según Riazi (2005), los datos de destilación de la norma ASTM D86 no representan el punto de ebullición real de los componentes de una fracción de petróleo. Los ingenieros de procesos están más interesados en el punto de ebullición real o verdadero (TBP) de los cortes en una mezcla de petróleo. Los datos de TBP atmosférica se obtienen a través de la destilación de una mezcla de petróleo usando una columna de destilación con 15-100 platos teóricos a relaciones de reflujo relativamente altas. El alto grado de fraccionamiento en estas destilaciones proporciona distribuciones de componentes precisas para las mezclas.

2.2.8.1.3. Destilación a Presión Reducida

Según Riazi (2005), las curvas de destilación atmosférica presentan los puntos de ebullición de los productos de una columna de destilación atmosférica. Para productos tales como gasóleos pesados que contienen compuestos pesados y pueden sufrir un proceso de craqueo durante la vaporización a presión atmosférica, los datos de destilación se miden a presiones reducidas de 1 a 760 mm Hg. El método de prueba ASTM D1160, normalmente se presenta a 1, 2, 10 o 50 mm Hg; y la temperatura del vapor no debe exceder los 400°C.

Además, Riazi (2005) explica que los datos de destilación de la ASTM D1160 se miden con mayor precisión que los de la ASTM D86, ya que se realizan a baja presión. Por esta razón, las curvas de la norma ASTM D1160 están más cerca de las curvas de TBP en la misma base de presión.

2.2.8.2. Densidad y gravedad específica

Según Riazi, (2005), la gravedad específica o la densidad de la mezcla de petróleo es una propiedad a granel que se puede medir directamente para la mezcla. La gravedad específica es una propiedad que indica la calidad de un producto de petróleo y, además es una propiedad útil para estimar varias propiedades físicas de los fluidos derivados del petróleo.

La gravedad específica está definida por la ecuación:

$$SG = 1.005 * d_{20} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

$$d_{20} = \text{Densidad a } 20^{\circ}\text{C}$$

2.2.8.3. Peso molecular

Según (Riazi, 2005), el peso molecular es otra propiedad a granel que es indicativa del tamaño y la estructura molecular. Esta es una propiedad importante que, por lo general, los laboratorios no miden y/o no informan cuando informan varias propiedades de las fracciones de petróleo.

El peso molecular está definido por la ecuación:

$$M = 42.965 * [\exp(2.097 * 10^{-4} * T_b - 7.78712 * SG + 2.08476 * 10^{-3} * T_b * SG)] * T_b^{1.26007} * SG^{4.98308} \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde:

T_b = Temperatura de ebullición al 50%

SG = Gravedad Específica

2.2.8.4. Índice de refracción

Según Riazi, (2005), los índices de refracción de los hidrocarburos varían de 1,35 a 1,6; sin embargo, los aromáticos tienen valores de índice de refracción mayores que los naftenos, que a su vez tienen índices de refracción mayores que las parafinas. Los aceites parafínicos tienen valores de índice de refracción más bajos. El índice de refracción es un parámetro útil para caracterizar los sistemas de hidrocarburos y, es necesario para estimar la composición de fracciones de petróleo no definidas.

2.2.8.5. Parámetro “m”

Según Riazi, (2005), el parámetro “m” identifica varios tipos de hidrocarburos, además de parafinas y aromáticos. Se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$m = M(n - 1.475) \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

M = Peso molecular

n = Índice de refracción a 20°C

2.2.8.4.1. Intercepción de refractividad

Según Riazi, (2005), el intercepción de refractividad (R_i) define el grupo de hidrocarburos, siendo alto para compuestos aromáticos y bajo para compuestos nafténicos, mientras que las parafinas tienen valores de R_i intermedios.

El intercepción de refractividad está definido por la ecuación:

$$R_i = n - \frac{d}{2} \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde:

R_i : Intercepto de refractividad

n : índice de refracción

d : densidad en g/cm^3 a 20°C

En la Tabla 6, se presentan los valores de los factores de caracterización para una fracción de petróleo.

Tabla 6

Valores de los Factores de Caracterización

Tipo de hidrocarburo	Rango de valores			
	M	R_i	VGC	I
Parafinas	337 - 535	1.048 - 1.05	0.74 - 0.75	0.26 - 0.273
Naftenos	248 - 429	1.03 - 1.046	0.89 - 0.94	0.278 - 0.308
Aromáticos	180 - 395	1.07 - 1.105	0.95 - 1.13	0.298 - 0.362

Tomado de Riazi (2005)

El Intercepto de Refractividad no es un indicador cuantitativo del contenido de parafinas, naftenos y aromáticos; una vez se combine con otras ecuaciones y parámetros recién dará un valor del contenido de parafinas, naftenos y aromáticos en porcentajes, presentes en la fracción de petróleo.

2.2.8.6. Análisis de la composición

Según (Riazi, 2005), las fracciones de petróleo son mezclas de muchos tipos diferentes de compuestos de hidrocarburos. Una mezcla de petróleo está bien definida si se conocen la composición y estructura de todos los compuestos presentes en la mezcla. Debido a la diversidad y cantidad de constituyentes de una mezcla de petróleo, la determinación de una composición tan

exacta es casi imposible. Por lo general, los hidrocarburos se pueden identificar por su número de carbonos o por la distribución del peso molecular.

Según (Riazi, 2005), para productos derivados del petróleo con un rango de ebullición estrecho y fracciones de petróleo en las que el rango del número de carbonos es bastante limitado, el conocimiento del tipo molecular de los compuestos es muy importante. Las propiedades de las fracciones de petróleo que tienen un análisis de composición detallado se pueden estimar con un mayor grado de precisión que las fracciones no definidas. Después de los datos de destilación, la composición de tipo molecular es la característica más importante de las fracciones de petróleo. En esta sección se presentan varios tipos de composición de fracciones de petróleo y diferentes métodos para su medición:

- PONA (Parafinas, Olefinas, Naftenos y aromáticos)
- PNA (Parafinas, Naftenos y Aromáticos)
- PIONA (Parafinas, Isoparafinas, Olefinas, Naftenos y Aromáticos)
- SARA (Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfaltenos)
- Análisis elemental (CHSNO)

2.2.8.5.1. Predicción de la composición PNA a partir del método API

Según (Riazi, 2005), para las fracciones en las que no se dispone de la viscosidad cinemática, se desarrollaron correlaciones en términos de otros parámetros de caracterización que están fácilmente disponibles o son predecibles.

Estos parámetros son gravedad específica, peso molecular y las ecuaciones predictivas que, para la composición de PNA son las siguientes:

$$x_p = 3.7387 - 4.0829 * SG + 0.014772 * m \quad \text{Ec. (5)}$$

$$x_N = -1.5027 + 2.10152 * SG - 0.02388 * m \quad \text{Ec. (6)}$$

$$x_A = 1 - (x_p - x_N) \quad \text{Ec. (7)}$$

Donde:

SG = gravedad específica a 20°C

m = parámetro “m”

Adema, hay autores que modificaron este método API. Según Liu et al. (2018) presenta una correlación alternativa a la del método API, realizada a partir de 233 cortes de productos de refinería. Este método incluye la gravedad específica como un parámetro adicional, y presentar diferentes conjuntos de coeficientes de correlación a, b ,c y d, de acuerdo al rango de ebullición del hidrocarburo líquido. Una limitación de este método es que esta limitado por la viscosidad, la cual debe ser mayor o igual a 5.5 mm²/s.

CAPITULO III: METODOLOGIA DE INVESTIGACION

3. Metodología

3.1. Hipótesis y especificación de variables

3.1.1. *Hipótesis general*

El rendimiento de producción y composición de líquidos mejora por la manipulación de parámetros físicos de operación de una pirólisis térmica en un reactor semicontinuo, utilizando mezcla de residuos plásticos de Polipropileno (PP) y Poliestireno (PS).

3.1.2. *Hipótesis específicas*

- El ratio de mezcla PP/PS de la alimentación tiene efecto sobre el rendimiento de los líquidos pirolíticos.
- El tamaño de partícula de la alimentación tiene efecto sobre el rendimiento de los líquidos pirolíticos.
- La temperatura de pirólisis tiene efecto sobre el rendimiento de los líquidos pirolíticos.
- El ratio de PP/PS tiene efecto sobre el contenido final de parafinas en los líquidos.
 - Ho: El ratio de PP/PS no tiene efecto sobre el contenido final de parafinas en los líquidos ($p > 0.05$ se acepta Ho y rechaza Ha)
 - Ha: El ratio de PP/PS tiene efecto sobre el contenido final de parafinas en los líquidos. ($p < 0.05$ se acepta Ha y rechaza Ho).

3.2. Variables propuestas para el proceso de pirólisis térmica

La pirólisis de plásticos como el Polipropileno (PP) y Poliestireno (PS), da líquidos con características similares a un combustible, gases con características similares a GLP o GN y

solidos en forma de carbón sólido y en polvo. Sin embargo, cada fracción rendirá de manera diferente, según se establezca sus variables.

En la tabla 7, se presentan las variables definidas para la presente investigación de pirólisis térmica.

3.2.1. Operacionalización De Las Variables

Tabla 7

Variables que intervienen en el proceso de pirólisis térmica

Variable	Tipo de Variable	Definición Operacional	Categorización	Indicadores	Instrumento de medición	Valor
Ratio de alimentación	Independiente	Es la proporción de cada tipo de plástico que entrará a la alimentación, representa la magnitud de una propiedad medible.	-	-	-	PP/PS:1/3 PP/PS: 3/1
Tamaño de partícula	Independiente	Se define como la dimensión física de cualquier objeto o partícula.	-	Diámetro de partícula	Calibrador	5 - 10 mm 20-24 mm
Temperatura	Independiente	Se define con la magnitud física que mide la cantidad de calor o energía térmica de un sistema.	Temperatura de pirólisis Temperatura de condensación	Calor Calor	Equipo de pirólisis térmica Equipo de condensación	415 °C - 450 °C 10 °C
Rendimiento de líquidos	Dependiente	Es el porcentaje de productos líquidos obtenidos respecto a la cantidad total de alimentación de materia prima al reactor.	-	-	Balanza digital	Ver resultados
Composición	Dependiente	Cantidad de parafinas, naftenos y aromáticos presentes en los productos líquidos obtenidos.	-	-	-	Ver resultados

3.2.2. Matriz de consistencia

En la tabla 8, se presentan la matriz de consistencia para la presente investigación.

Tabla 8

Matriz de consistencia

Problema General		Objetivo General	Hipótesis General	
¿Cuál es el rendimiento de producción de líquidos y composición obtenidos por manipulación de parámetros físicos de operación de una pirólisis térmica en un reactor semicontinuo, utilizando mezcla de residuos plásticos de Polipropileno (PP) y Poliestireno (PS)?		Evaluar el rendimiento de producción y composición de líquidos por manipulación de parámetros físicos de operación de una pirólisis térmica en un reactor semicontinuo, utilizando mezcla de residuos plásticos de Polipropileno (PP) y Poliestireno (PS).	El rendimiento de producción y composición de líquidos mejora por la manipulación de parámetros físicos de operación de una pirólisis térmica en un reactor semicontinuo, utilizando mezcla de residuos plásticos de Polipropileno (PP) y Poliestireno (PS).	
ASPECTOS ESPECÍFICOS				
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis Específica	Variables de las hipótesis específicas	Técnicas de recolección de datos
¿Cuál es el efecto del ratio de mezcla PP/PS de la alimentación en el rendimiento de los líquidos pirolíticos?	Evaluar el efecto del ratio de mezcla PP/PS de la alimentación en el rendimiento de los líquidos pirolíticos.	El del ratio de mezcla PP/PS de la alimentación tiene efecto sobre el rendimiento de los líquidos pirolíticos.	> Ratio de alimentación	> Ensayos de pirólisis para diferentes ratios de alimentación. > Cálculos del rendimiento de la pirólisis. > Elaboración de curvas de líquidos vs. tiempo.

Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis Específica	Variables de las hipótesis específicas	Técnicas de recolección de datos
¿Cuál es el efecto del tamaño de partícula en el rendimiento de los líquidos pirolíticos?	Evaluar el efecto del tamaño de partícula en el rendimiento de los líquidos pirolíticos.	El tamaño de partícula de la alimentación tiene efecto sobre el rendimiento de los líquidos pirolíticos.	> Tamaño de partícula	<ul style="list-style-type: none"> > Ensayos de pirólisis para diferentes tamaños de partícula. > Cálculos del rendimiento de la pirólisis. > Elaboración de curvas de líquidos vs. tiempo.
¿Cuál es el efecto de la temperatura en el rendimiento de los líquidos pirolíticos?	Evaluar el efecto de la temperatura en el rendimiento de los líquidos pirolíticos.	La temperatura de pirólisis tiene efecto sobre el rendimiento de los líquidos pirolíticos.	> Temperatura de pirólisis.	<ul style="list-style-type: none"> > Ensayos de pirólisis térmica para diferentes temperaturas. > Cálculos del rendimiento de la pirólisis. > Elaboración de curvas de temperatura vs. Tiempo.
¿Cuál es el efecto del ratio de PP/PS sobre el contenido final de parafinas en los líquidos?	Determinar el efecto del ratio de PP/PS sobre el contenido final de parafinas en los líquidos	El ratio de PP/PS tiene efecto sobre el contenido final de parafinas en los líquidos.	> Ratio de alimentación	<ul style="list-style-type: none"> > Determinación de características organolépticas. > Análisis físico- químico de la fracción líquida > Estimación del contenido de parafinas en los líquidos

3.3. Tipo y diseño de investigación

3.3.1. Tipo y diseño de investigación

Según Hernandez Sampieri, Fernandez Collado, & Baptista Lucio (2014), los estudios cuantitativos tienen diferentes tipos de alcance: exploratorio, descriptivo, correlacional y explicativo. En este caso, la presente investigación es del tipo explicativa debido a que se cuenta con variables independientes (temperatura, ratio de alimentación y tamaño de partícula) y dependientes (rendimiento de líquidos y composición) para y se brinda una explicación de la relación entre ellas. Asimismo, los autores señalan que existen dos tipos de enfoque de la investigación: cuantitativo y cualitativo y dos tipos de diseño: experimentales y no experimentales. En este caso, la presente investigación tiene un enfoque cuantitativo con un diseño experimental al ejercer un control, objetivo y sistemático, sobre una variable independiente.

3.3.2. Diseño Experimental

El diseño experimental propuesto para el presente trabajo de investigación es el Diseño Factorial debido a que es el más utilizado cuando se tiene dos o más variables independientes (Bao, 2020), Para esta investigación se tienen las siguientes variables:

- Ratio de mezcla PP:PS
- Tamaño de partícula
- Temperatura

Para cada caso, los niveles de las variables serán dos (02), por lo tanto, teniendo tres factores (variables independientes) y dos niveles, el número de pruebas a realizar será $[2^3]=8$ pruebas, con 3 repeticiones las cuales deben tener un error porcentual menor a 3% con el fin de corroborar los resultados obtenidos haciendo un total de 24 pruebas experimentales.

En la tabla 9 se muestran los niveles de cada variable, asimismo en la tabla 10 se muestra la matriz de diseño y en la tabla 11 se muestran las combinaciones de los diseños experimentales.

Tabla 9

Variables y niveles del diseño factorial

Variables	Niveles	
	-1	1
Temperatura (°C)	415	450
Tamaño de partícula (mm)	5-10	20-24
Ratio de mezcla PP:PS	1:3	3:1

Tabla 10

Matriz de diseño

N° de experiencia	Diseño	FACTORES			Respuesta
		A	B	C	
1	1	-1	-1	-1	1
2	A	1	-1	-1	a
3	B	-1	1	-1	b
4	AB	1	1	-1	ab
5	C	-1	-1	1	c
6	AC	1	-1	1	ac
7	BC	-1	1	1	bc
8	ABC	1	1	1	abc

Tabla 11*Combinaciones de los niveles experimentales*

N° de experiencia	Diseño	FACTORES			Respuesta
		A (Temperatura - °C)	B (Tamaño de partícula - mm)	C (Ratio de mezcla PS: PP)	
1	1	415	5-10	1:3	1
2	A	450	5-10	1:3	a
3	B	415	20-24	1:3	b
4	AB	450	20-24	1:3	ab
5	C	415	5-10	3:1	c
6	AC	450	5-10	3:1	ac
7	BC	415	20-24	3:1	bc
8	ABC	450	20-24	3:1	abc

Los efectos de las variables de entrada y la interacción entre éstos se evaluarán de acuerdo a las ecuaciones de Montgomery (2004) para un diseño factorial de 2^3 .

3.3.3. Desarrollo de la investigación

3.3.3.1. Primera etapa

Consiste en la búsqueda de información del tema elegido: antecedentes, tablas de propiedades, tipo de investigación y demás; todo esto para elaborar el plan de tesis.

3.3.3.2 Segunda etapa

Se llevó a cabo:

- Adecuación del reactor de pirólisis.
- Adaptación del sistema de enfriamiento.
- Adaptación del sistema de calentamiento.

- Adaptación del sistema de quema de gases.
- Además, se harán las pruebas de operación del reactor.
- Realización de ensayos a diferentes temperaturas, ratios de mezcla de alimentación y tamaños de muestra para tomar datos del rendimiento de líquidos.

3.3.3.3 Tercera etapa

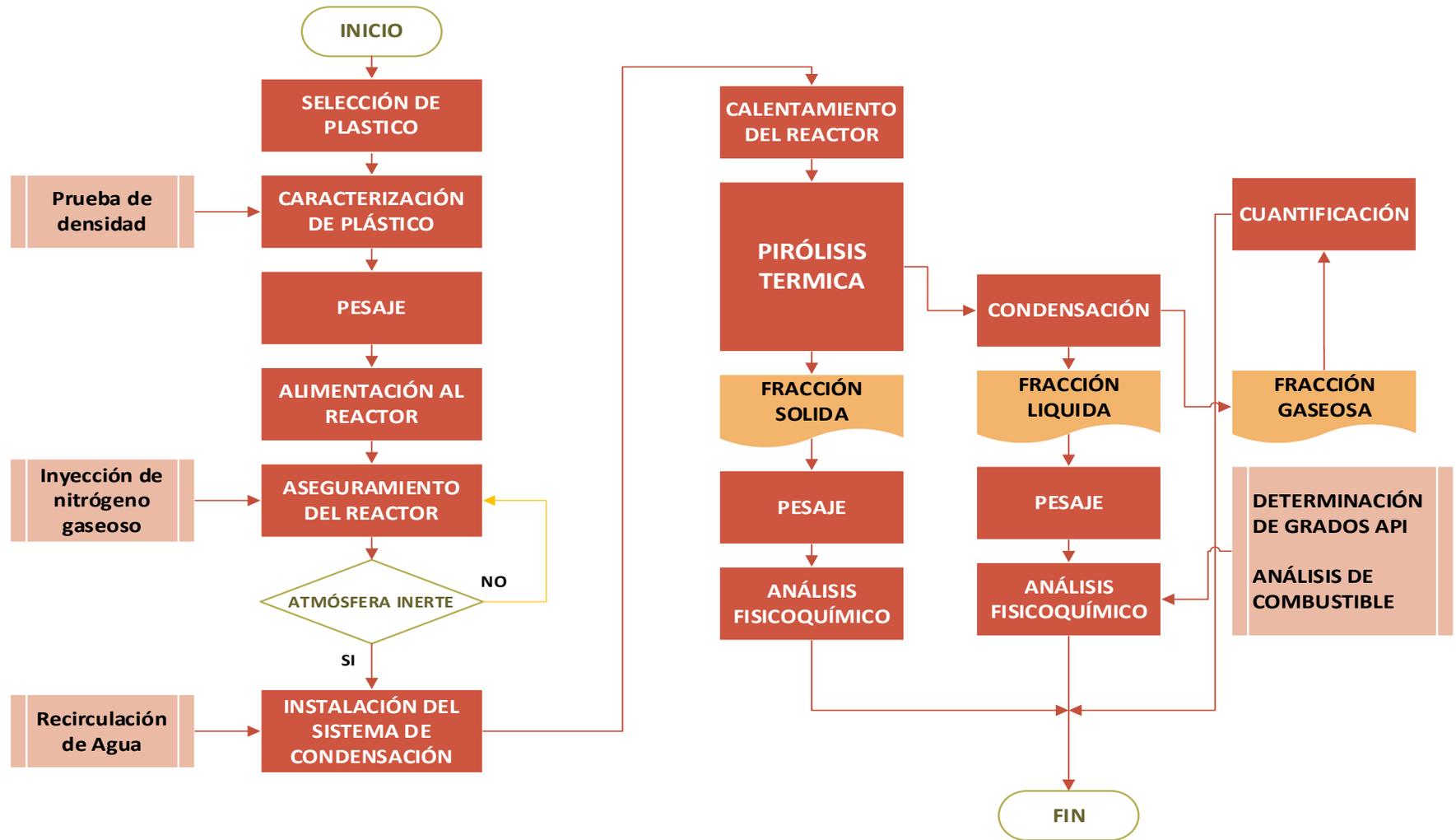
Se llevó a cabo:

- Análisis físico químico de los líquidos obtenidos para determinar sus propiedades, mediante pruebas de caracterización de hidrocarburos totales.
- Análisis de datos obtenidos y su respectiva discusión.
- Elaboración del informe final y presentación.

Como se observa en la Figura 10, el flujograma para la presente investigación de pirolisis.

Figura 10

Flujograma del proceso pirólisis para la presente investigación



3.4. Unidad de análisis

La unidad de análisis de esta investigación son el PP y PS, los cuales son termoplásticos de número de reciclaje 5 y 6 respectivamente. El PP y PS usados fueron obtenidos residuos de plástico de tapers y tapas de vasos descartables.

3.5. Variables

3.5.1. Variables independientes

- Ratio de mezcla PS: PP
- Temperatura (°C)
- Tamaño de partícula (mm)

3.5.2. Variables dependientes

- Rendimiento de la fracción líquida
- Composición de la fracción líquida

3.6. Tamaño de muestra

Para la determinación del tamaño de muestra, según Hernandez Sampieri, Fernandez Collado, & Baptista Lucio (2014) para muestras no probabilísticas, el tamaño de muestra dependerá de las características de investigación, dentro de este enfoque el volumen del reactor de pirólisis y el tamaño de partícula determinarán el tamaño de muestra.

Siendo así, el valor 120 g de alimentación el elegido porque llena al 80% el volumen del reactor con tamaño de partícula 20 – 24 mm; y de acuerdo al diseño experimental se precisa de un total de 24 ensayos dando una cantidad necesaria de 2880 g (2.88 kg).

3.7. Recolección de datos

Las técnicas y procedimientos para la recolección de información se llevaron a cabo en:

- Biblioteca de Ingeniería Química

Respecto a la segunda y tercera etapa, adaptación del reactor de pirólisis y parte experimental se efectuaron en:

- Planta de alcoholes
- Laboratorio de Control de la Contaminación Ambiental

Pertenecientes a la Escuela Profesional de Ingeniería Química, ubicada en la Ciudad Universitaria de Perayoc, de la ciudad del Cusco, provincia del Cusco.

La determinación de parafinas, naftenos y aromáticos de los líquidos obtenidos, se realizaron mediante ecuaciones de predicción de composición de fracciones de petróleo.

3.8. Desarrollo experimental

Una vez llevada a cabo la caracterización de la muestra de poliestireno se procedió a realizar la pirólisis térmica. Se realizó 3 ensayos para cada combinación de las variables de entrada.

El procedimiento realizado fue:

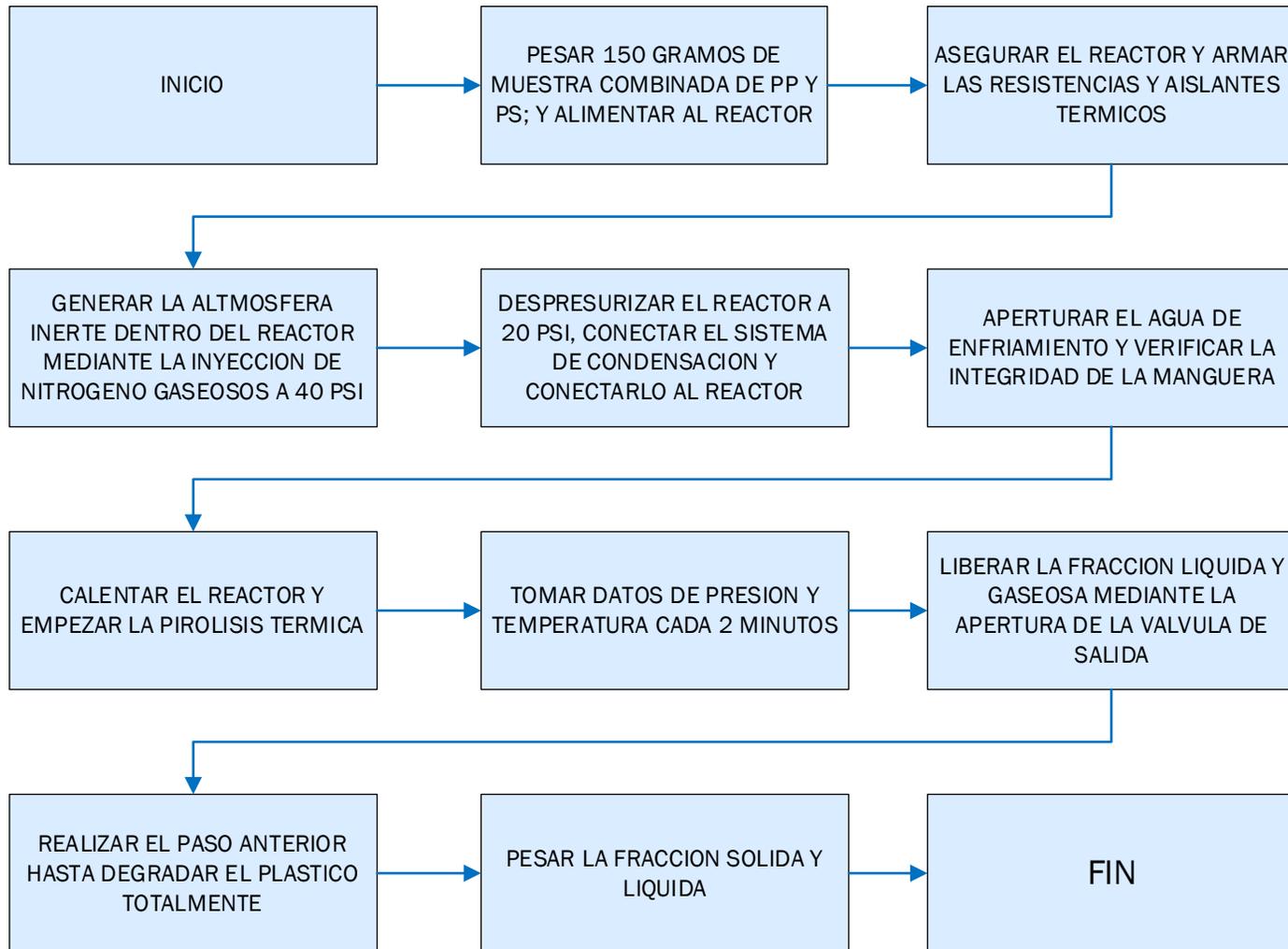
- Pesar la muestra de PP y PS, mezclar homogéneamente y posteriormente colocar la muestra dentro del reactor asegurándose su distribución uniforme.
- Cerrar el reactor y cargar con nitrógeno a 50 psi y comprobar con espuma jabonosa las conexiones roscadas, para cerciorar que no existan fugas, este proceso toma 5 min de espera para corroborar que la presión no disminuya. Aperturar la válvula de salida de producto y descompresión de presión hasta los 20 psi.

- Instalación del sistema de condensación para la recolección de la fracción líquida acoplado mediante una unión universal; las probetas se pondrán en sus respectivas posiciones, posterior a esto se apertura del agua y corrobora que no tenga fugas las mangueras.
- Encender el reactor de pirólisis, sistema de control de temperatura y sistema de medición de temperatura. Se toman datos de temperatura y presión cada 2 min hasta finalizar el proceso, respetándose las rampas de calentamiento programadas.
- Cada delta de 30 psi incrementados en presión se procede a abrir la válvula para liberar los gases producidos, hasta volver a tener un delta de presión de 0. Esto se repetirá hasta haber degradado el material plástico en su totalidad produciendo como productos finales fracción líquida, gases no condensables y solidos.
- Finalmente haciendo uso de una balanza digital, se pesa la fracción líquida recuperada; después de enfriar el reactor por convección natural se destapa el reactor y se procede a recuperar la fracción sólida existente en el fondo del reactor e igualmente sea pesada en la balanza digital.
- Culminado el proceso se realiza una limpieza de los materiales y el equipo con unos paños y cepillos aplicando disolvente químico.

Como se observa en la Figura 10, se presentan los pasos a realizar para las corridas experimentales en el proceso de pirólisis.

Figura 11

Diagrama de procedimiento para el desarrollo experimental



3.9. Materiales, equipos y materia prima

3.9.1. *Materiales*

- Probeta de vidrio de 25 ml, 50 ml y 100 ml.
- Mangueras de polipropileno
- Aislante térmico de fibra de vidrio
- Lamina comprimida de asbesto
- Resistencia eléctrica de kanthal para horno

3.9.2. *Reactivos*

- Residuos de PP
- Residuos de PS
- Tíner Acrílico
- Silicona Automotriz Mega Grey
- Nitrógeno Gaseoso Industrial

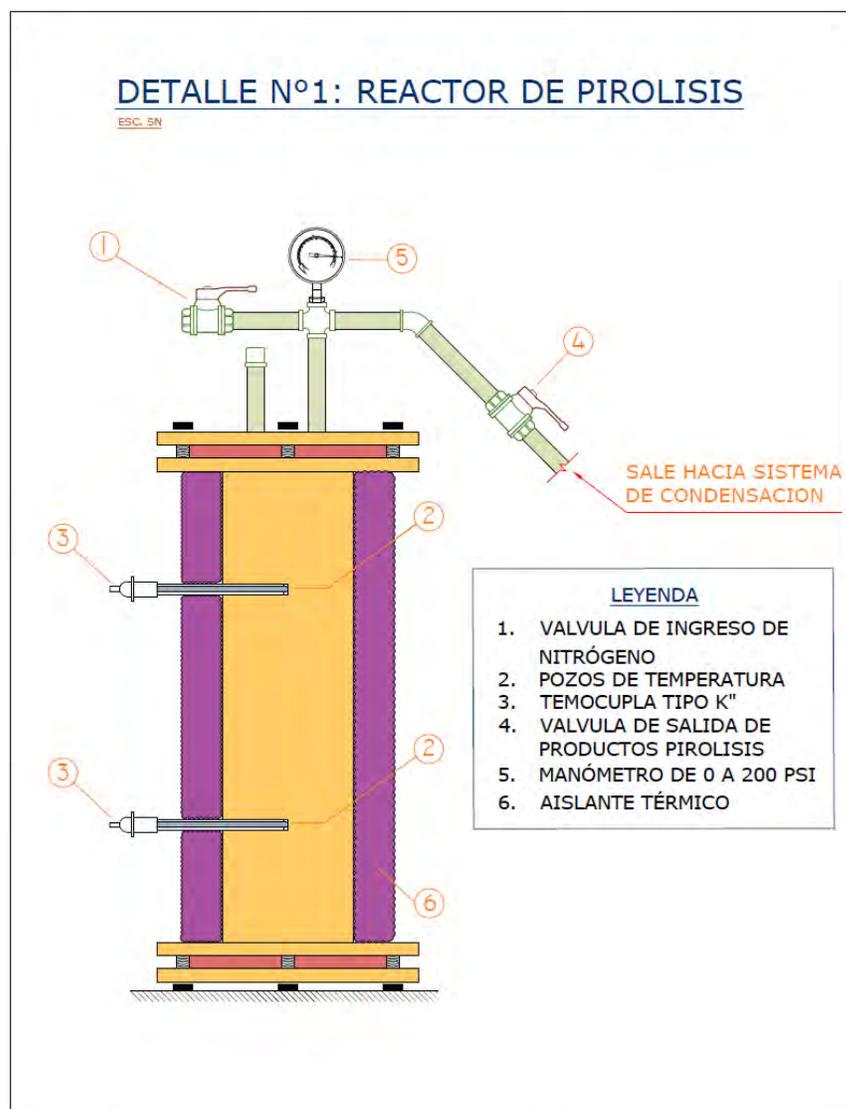
3.9.3. *Equipos*

- **Balanza digital:** De 500 g, modelo SF-400, marca Digital Precisión
- **Reactor de pirólisis térmica:** De acero inoxidable con tapas tipo bridas, y orificios de medición de temperatura.

Como se observa en la figura 12, el reactor de pirólisis tenía 2 pozos de temperatura.

Figura 12

Reactor de Pirólisis



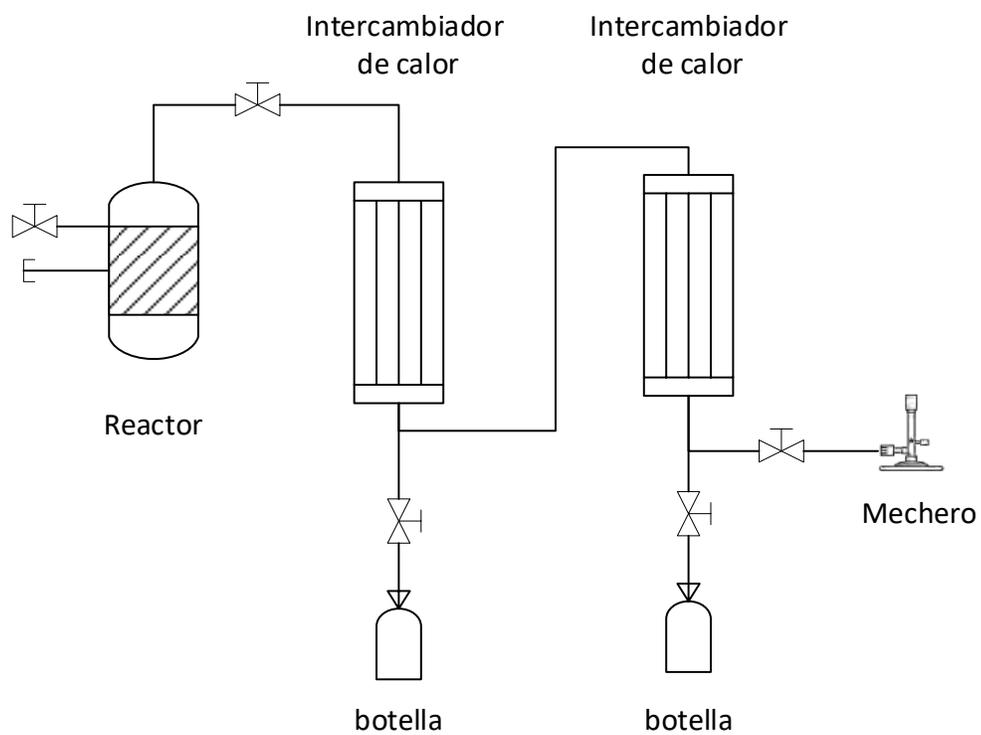
- **Sistema de enfriamiento:** Intercambiador de calor de coraza y tubo, líquido refrigerante a utilizar agua, en flujo contracorriente.
- **Sistema de atmósfera inerte:** Balón de nitrógeno con reguladores de baja presión, manguera de gas reforzada.

- **Controlador e indicador de temperatura:** El controlador de temperatura digital modelo ax4; será utilizado con el propósito de visualizar la temperatura en la pared exterior del reactor.
- **Controlador de voltaje:** para control de voltaje de 220 Voltios para resistencia eléctrica de 4000 Watts, con fusible de 10 amperios.
- **Termocupla:** Tipo K con rangos de trabajo de 0 a 1000 °C; será utilizado con el propósito de medir la temperatura dentro del horno.
- **Controlador de presión:** Regulador de presión de 1ra etapa a 1 bar y 2da etapa a 28 mm bar.
- **Sistema de quema de gases incondensables:** Mechero bunsen.

En la Figura 13, se observa los equipos del proceso de pirólisis compuesto por 1 reactor, 2 condensadores y un mechero para la quema de gases no condensables, esquema elaborado por los investigadores del presente trabajo.

Figura 13

Diagrama esquemático del reactor de pirólisis



CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

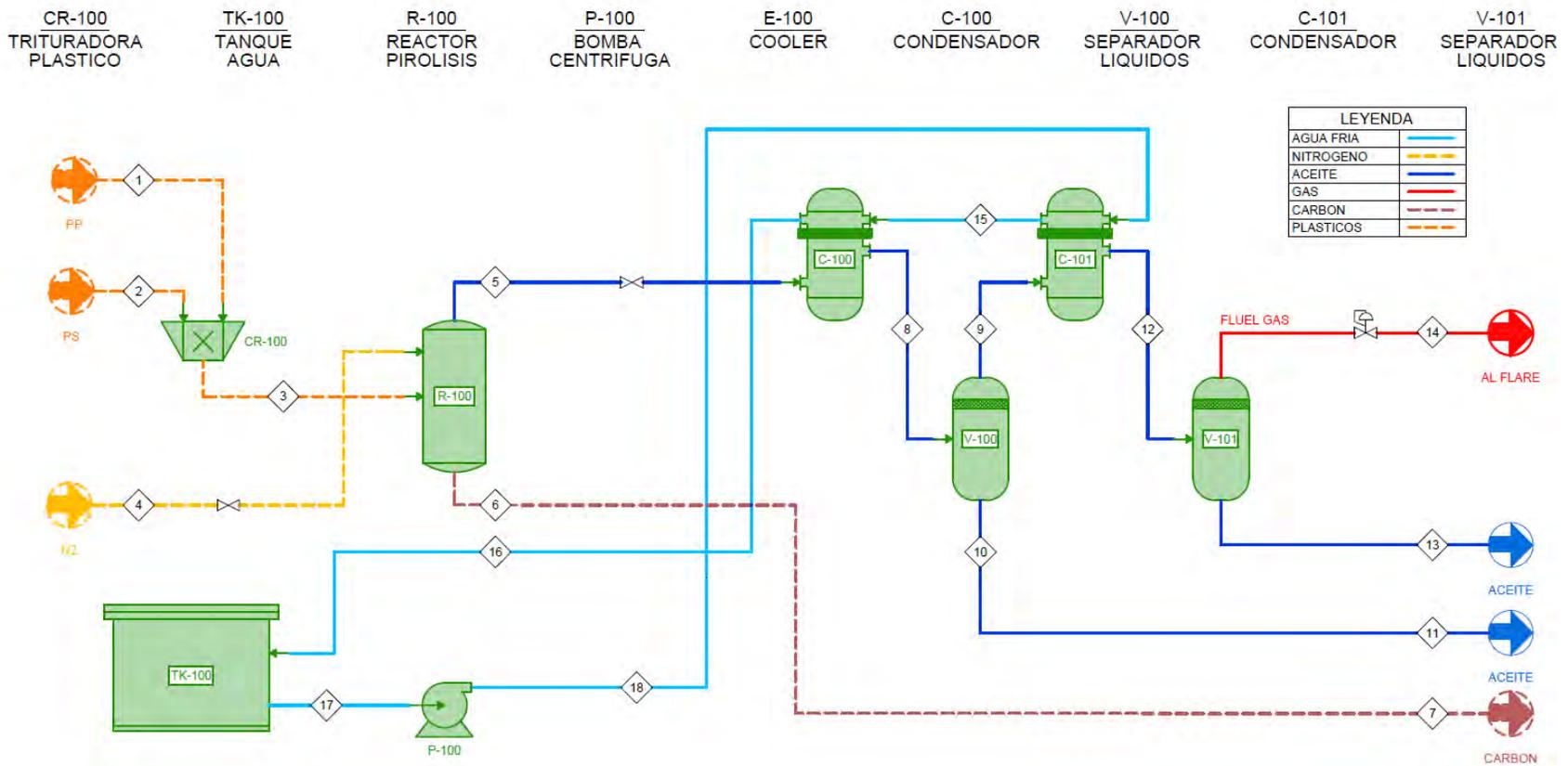
4.1. Proceso de pirólisis adaptado para el PP y PS

Para el presente trabajo se adaptaron los equipos reactor semicontinuo, condensadores, sistema de recirculación de agua y demás. Permitiendo su posterior ensamblaje para un proceso de pirólisis para presión positiva.

En la Figura 14, se muestra el diagrama PFD del proceso de pirólisis realizado en el cual se observa los equipos utilizados, la materia prima y productos obtenidos.

Figura 14

Diagrama PFD del proceso de pirólisis



4.2. Resultados de la caracterización de la materia prima

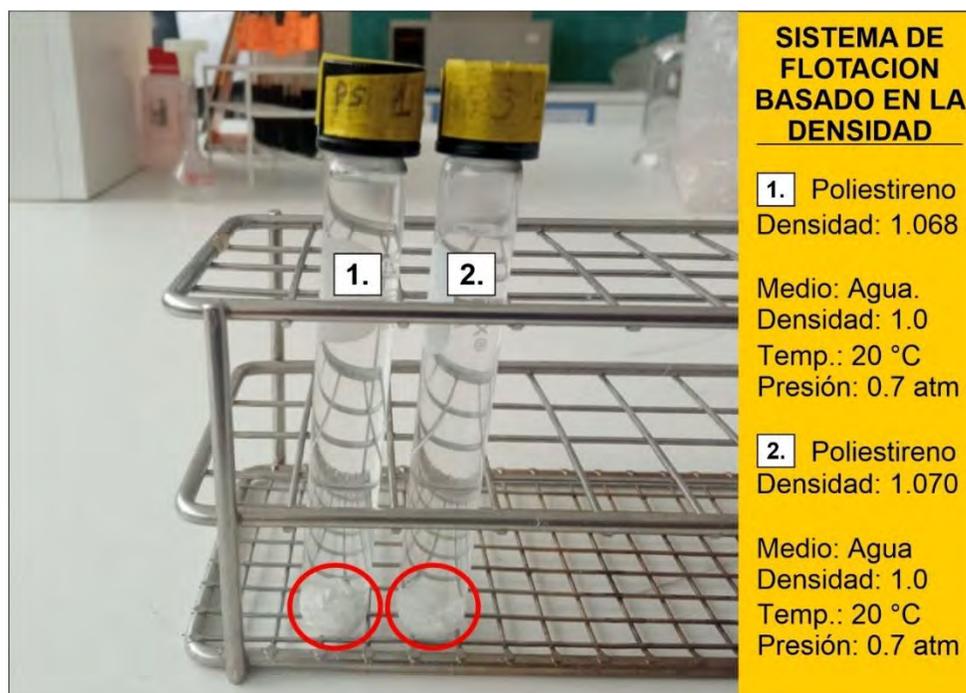
4.1.1. Determinación del tipo de poliestireno y su densidad

Para determinar la densidad relativa del PS se utilizó la técnica de flotación. Como se observa en la Figura 15, las muestras de PS se hunden al ser colocadas en agua destilada de densidad 0.998 g/cm^3 a 293 °K (Green & Southard, 2019). Por lo tanto, el PS tiene mayor densidad que el agua destilada.

Para determinar el valor exacto de la densidad, se utilizó el método de desplazamiento de volumen con agua destilada, en el cual se obtuvieron densidades de 1.07 y 1.068 g/cm^3 para los dos tipos de poliestireno utilizados en la pirólisis. Por lo tanto, se infiere que la muestra corresponde al poliestireno de alto impacto modificado el cual tiene una densidad de 1.07 g/cm^3 (Wang et al. 2019).

Figura 15

Prueba de Densidad para PS



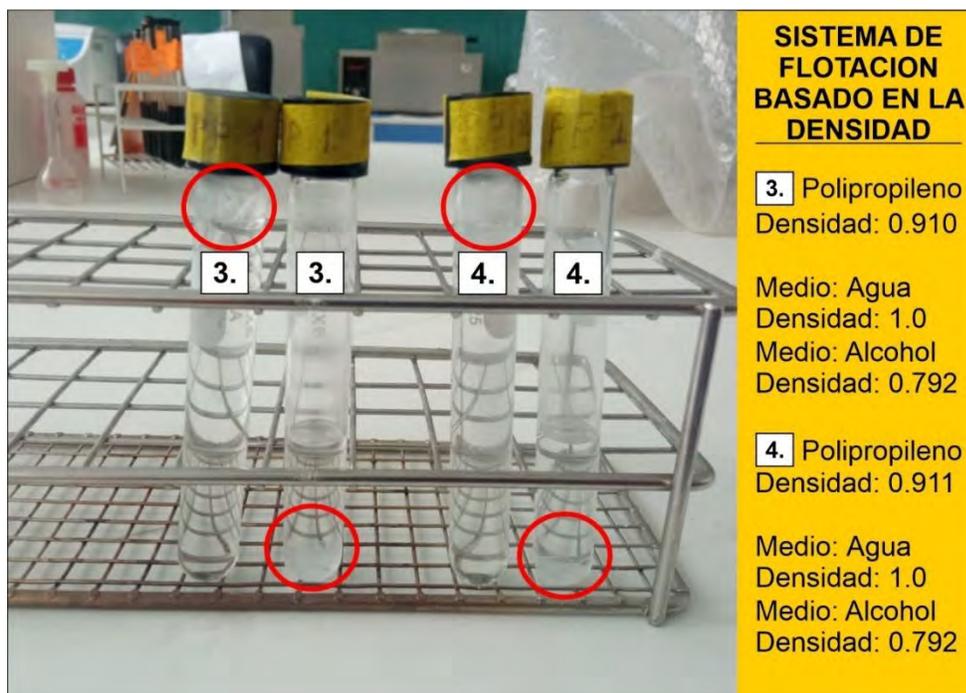
4.1.2. Determinación del tipo de polipropileno y su densidad

Para determinar la densidad relativa del PP se utilizó la técnica de flotación en dos medios: agua destilada y alcohol isopropílico. Como se observa en la Figura 16. las muestras de PP flotan al ser colocadas en agua destilada de densidad 0.998 g/cm^3 (Green & Southard, 2019) y se hunden al ser colocadas en alcohol isopropílico de densidad 0.7925 al 97% (Green & Southard, 2019); por lo tanto, la densidad de la muestra de polipropileno se encuentra en el rango de 0.998 a 0.7925 g/cm^3 .

Para determinar un valor exacto de la densidad, se utilizó el método de desplazamiento de volumen con alcohol isopropílico en el cual se obtuvo densidades de 0.91 y 0.911 g/cm^3 . Por lo tanto, se infiere que la muestras de PP corresponden al polipropileno copolímero aleatorio de densidad $0.90 - 0.91 \text{ g/cm}^3$ Sahin & Yayla (2005).

Figura 16

Prueba de Densidad para PP



4.2. Productos derivados de la pirólisis térmica de la mezcla PP y PS

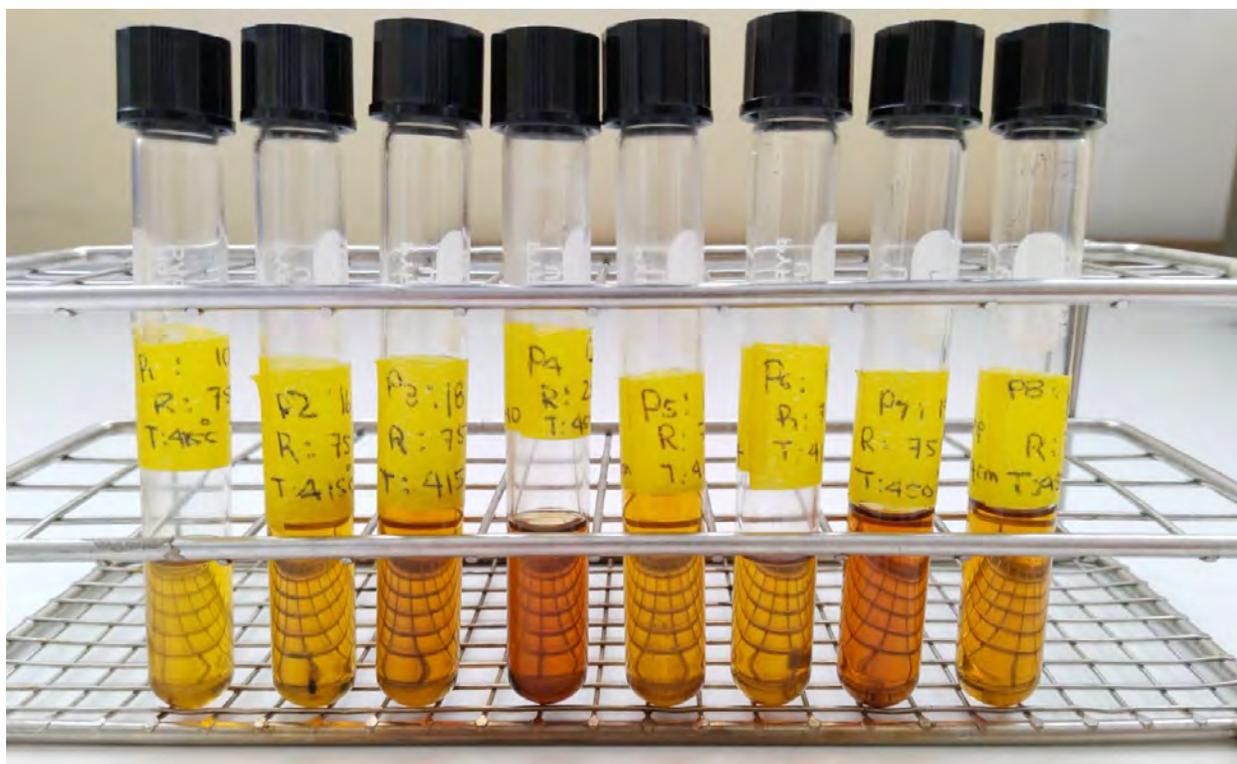
4.2.1. Fracción líquida

Las fracciones líquidas obtenidas se ven como un fluido de viscosidad baja, mostrando su principal diferencia en la coloración que exhibe cada una.

Como se aprecia en la Figura 17, los líquidos pirolíticos exhiben un color amarillo claro debido al mayor contenido de PP y de un color amarillo caramelo oscuro debido al mayor contenido de PS.

Figura 17

Fracción líquida resultante de la pirólisis térmica



4.2.2. Fracción sólida

La fracción sólida resultante del proceso de pirólisis para las 8 corridas son: pequeñas masas negras de consistencia seca y granulada, granulada al tacto, con un olor a plástico quemado. Como se aprecia en la Figura 18, el color negro intenso y masas granuladas secas, son prueba de que se dio una pirólisis completa al interior del reactor.

Figura 18

Fracción sólida resultante de la pirólisis térmica



4.2.3. Fracción gaseosa

La fracción gaseosa o fluidos no condensables producida durante el proceso de pirólisis se quemaron en un mechero bunsen con una flama regulada para una combustión completa.

Como se observa en la Figura 19, antes de la combustión de los gases no condensables se regula presión de salida de los gases, a presiones reguladas de 0 a 25 m bar, por medio de un regulador de segunda etapa y posteriormente combustionar en el mechero bunsen con acción controlada de llama baja para maximizar el tiempo de estos gases dentro del sistema de condensación.

Figura 19

Fracción gaseosa resultante de la pirólisis térmica



4.3. Rendimiento de los productos finales

El cálculo del rendimiento del proceso de pirólisis fue hecho en función al peso obtenido antes y después de la degradación térmica, en las fracciones sólidas y líquidas fueron expresadas en gramos y para la fracción gaseosa se utilizó una correlación directa entre la diferencia de estos para llegar a los 120 g.

4.3.1. Rendimiento de productos de pirólisis

En la tabla 12, se presentan los resultados del rendimiento de líquido, sólido y gas promedio obtenidos y expresados en porcentaje; además se presenta la desviación estándar.

Tabla 12

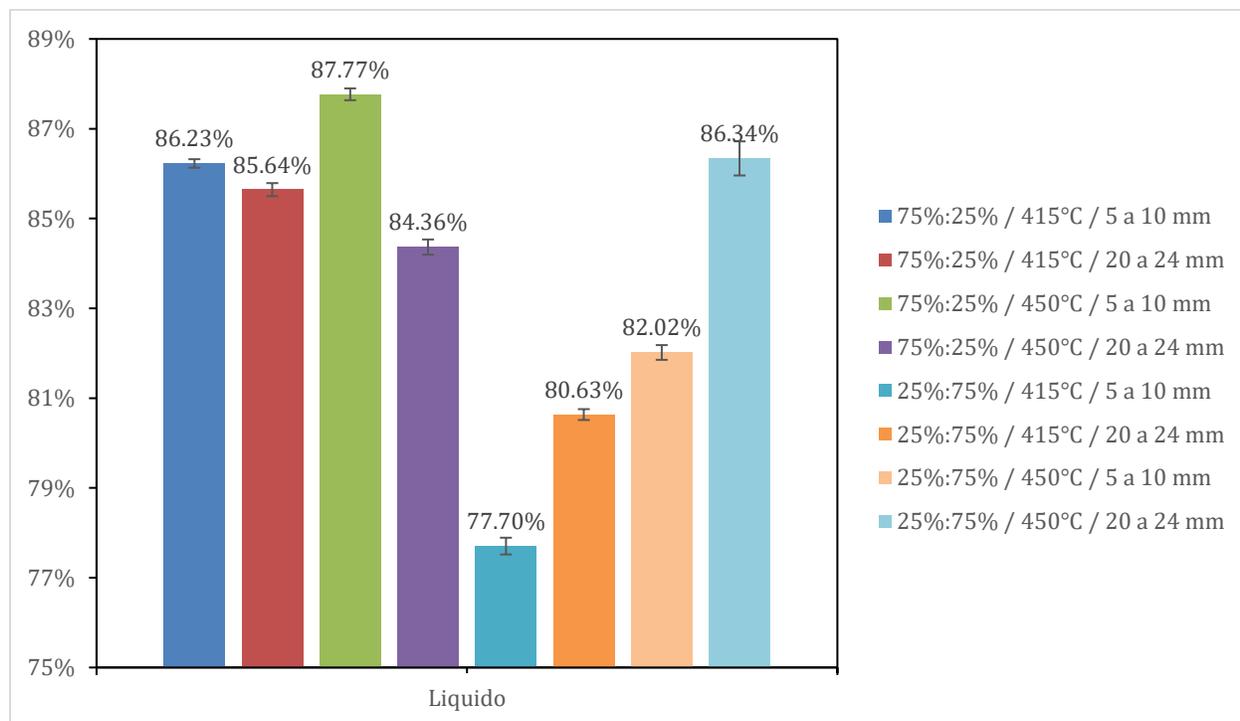
Rendimiento de productos finales de la pirólisis térmica

Ratio PP:PS	Temp. °C	Partícula mm	Líquido		Sólido		Gas	
			%	σ	%	σ	%	σ
3:1	415	5 a 10	86.23%	0.11%	9.46%	0.36%	4.31%	0.26%
3:1	415	20 a 24	85.64%	0.17%	9.84%	2.04%	4.52%	1.88%
3:1	450	5 a 10	87.77%	0.15%	4.48%	0.03%	7.75%	0.18%
3:1	450	20 a 24	84.36%	0.20%	5.07%	0.08%	10.56%	0.13%
1:3	415	5 a 10	77.70%	0.24%	16.70%	0.13%	5.60%	0.21%
1:3	415	20 a 24	80.63%	0.15%	17.61%	0.83%	1.76%	0.70%
1:3	450	5 a 10	82.02%	0.20%	15.55%	0.30%	2.43%	0.50%
1:3	450	20 a 24	86.34%	0.44%	13.26%	0.42%	0.40%	0.08%

Como se observa en la Figura 20, se obtuvieron rendimientos de la fracción líquida del 77.70% al 87.77% con desviaciones estándar menores a un 0.5% en todos los casos.

Figura 20

Rendimiento de líquidos pirolíticos con desviación estándar



A partir de los resultados obtenidos de la tabla 12, se obtiene 2 afirmaciones: primero se afirma que un ratio de alimentación PP:PS / 3:1, una temperatura alta de (450°C) y un tamaño de partícula de (5 - 10 mm) están directamente relacionados con el mayor rendimiento de la fracción líquida; y segundo, se afirma que un ratio de alimentación PP:PS / 1:3, una temperatura baja de (415°C) y un tamaño de partícula de (5 - 10 mm) están directamente relacionados con el menor rendimiento de líquidos pirolíticos.

En el trabajo realizado por Sakata et al. (1999), se estudió la pirólisis de PP puro para temperaturas superiores a 380°C, donde obtuvo un rendimiento líquido de 80.1% en peso. El alto rendimiento de la fracción líquida también fue respaldado por FakhrHoseini & Dastanian (2013) para una temperatura de 500°C y un rendimiento líquidos de 80.65%. Sin embargo, en el trabajo

realizado por Zambrano Bonilla (2021), quien estudió la pirólisis de PP/PS en un ratio de 3:1, obtuvo una eficiencia en la fracción líquida de 68.92% a 400°C y tamaño de partícula de 20 - 24 mm. De acuerdo con la presente investigación para las mismas condiciones de composición, tamaño de partícula y temperatura de 415°C, se obtuvo una eficiencia de la fracción líquida de 86%. Siendo así, se infiere que a mayor contenido de PP, mejora la interacción del PP y PS en el rendimiento de la fracción líquida. Además, la diferencia de rendimiento de la fracción líquida con respecto al investigador Zambrano Bonilla (2021), se debe en gran parte a la variedad PP disponibles en el mercado y su uso específico, lo cual influye en su composición y por ende su rendimiento de la fracción líquida.

En el trabajo realizado por Onwudili et al. (2009), se exploró la pirólisis de PS puro para temperaturas de 300°C a 500°C en un reactor batch, donde obtuvieron un rendimiento líquido de 95% en peso. El alto rendimiento de la fracción líquida también fue respaldado por Nisar et al. (2019) quienes obtuvieron un rendimiento líquido de 83% para una temperatura de 410°C trabajando en un reactor semicontinuo. Sin embargo, en el trabajo realizado por, Zambrano Bonilla (2021), quien realizó la pirólisis de PP/PS en un ratio de 1:3, obtuvo un rendimiento de la fracción líquida de 82.33% a 400°C y tamaño de partícula de 20 - 24 mm. De acuerdo con la investigación para las mismas condiciones de tamaño de partícula y temperatura de 415°C, se obtuvo una eficiencia de la fracción líquida de 81%. Siendo así, se infiere que, a mayor presencia de PS, la interacción del PP y PS inhibe el rendimiento de la fracción líquida. Además, la diferencia de rendimiento de la fracción líquida del 1.33% con respecto al investigador Zambrano Bonilla (2021), se debe a una diferencia en la composición del poliestireno en espuma, contra el de alto impacto modificado el cual posee una mayor cantidad de aditivos y por consiguiente un mayor contenido de componentes inorgánicos los cuales no se degradan

térmicamente, quedándose como una fracción sólida de características oscuras en las paredes y base del reactor.

4.3.2. Análisis Estadístico

Hipótesis planteada:

- Ho: Al menos un factor no afecta el rendimiento de líquidos pirolíticos.
- H1: Al menos un factor afecta en el rendimiento de líquidos pirolíticos.

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Estadístico de prueba: Análisis factorial de 3 factores y 2 niveles

Para el análisis estadístico se utilizó el software Minitab 19, considerando la relación existente entre los factores: Temperatura, Tamaño de partícula y Ratio de mezcla PP/PS sobre el rendimiento de la fracción líquida. De acuerdo con esto se obtuvieron los resultados expuestos a continuación.

En la tabla 13, se presenta el resumen de R^2 obtenidos en Minitab 19.

Tabla 13

Datos de resumen del modelo

S	R^2 .	R^2 . (ajustado)	R^2 . (predeterminado)
0.002286	99.66%	99.51%	99.24%

Dado el total de datos analizados, de acuerdo con la tabla 13, se obtuvo que tanto R^2 como R^2 . (Ajustado) ≥ 0.95 . Por lo tanto, se acepta el modelo establecido.

El modelo obtenido en Minitab 19 es:

$$\begin{aligned} \text{Líquidos\%} = & 0.3043 + 0.001076 \text{ Temperatura} - 0.01291 \text{ Tamaño de partícula} \\ & + 0.0740 \text{ Ratio PP/PS} + 0.000037 \text{ Temperatura} \\ & * \text{Tamaño de partícula} - 0.000087 \text{ Temperatura} * \text{Ratio PP/PS} \\ & + 0.01160 \text{ Tamaño de partícula} * \text{Ratio PP/PS} \\ & - 0.000030 \text{ Temperatura} * \text{Tamaño de partícula} * \text{Ratio PP/PS} \end{aligned}$$

En la Tabla 14, se presenta el ANOVA, valores F, P-values; obtenidos.

Tabla 14

Análisis de varianza (ANOVA)

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	0.024645	0.003521	673.73	0
Lineal	3	0.015598	0.005199	994.94	0
Temperatura	1	0.003963	0.003963	758.31	0
Tamaño de partícula (mm)	1	0.0004	0.0004	76.56	0
Ratio PP/PS	1	0.011235	0.011235	2149.95	0
Interacciones de 2 términos	3	0.008382	0.002794	534.67	0
Temperatura*Tamaño de partícula	1	0.000076	0.000076	14.61	0.002
Temperatura*Ratio PP/PS	1	0.00357	0.00357	683.22	0
Tamaño de partícula*Ratio PP/PS	1	0.004736	0.004736	906.19	0
Interacciones de 3 términos	1	0.000665	0.000665	127.24	0
Temperatura*Tamaño de partícula *Ratio PP/PS	1	0.000665	0.000665	127.24	0
Error	16	0.000084	0.000005		
Total	23	0.024729			

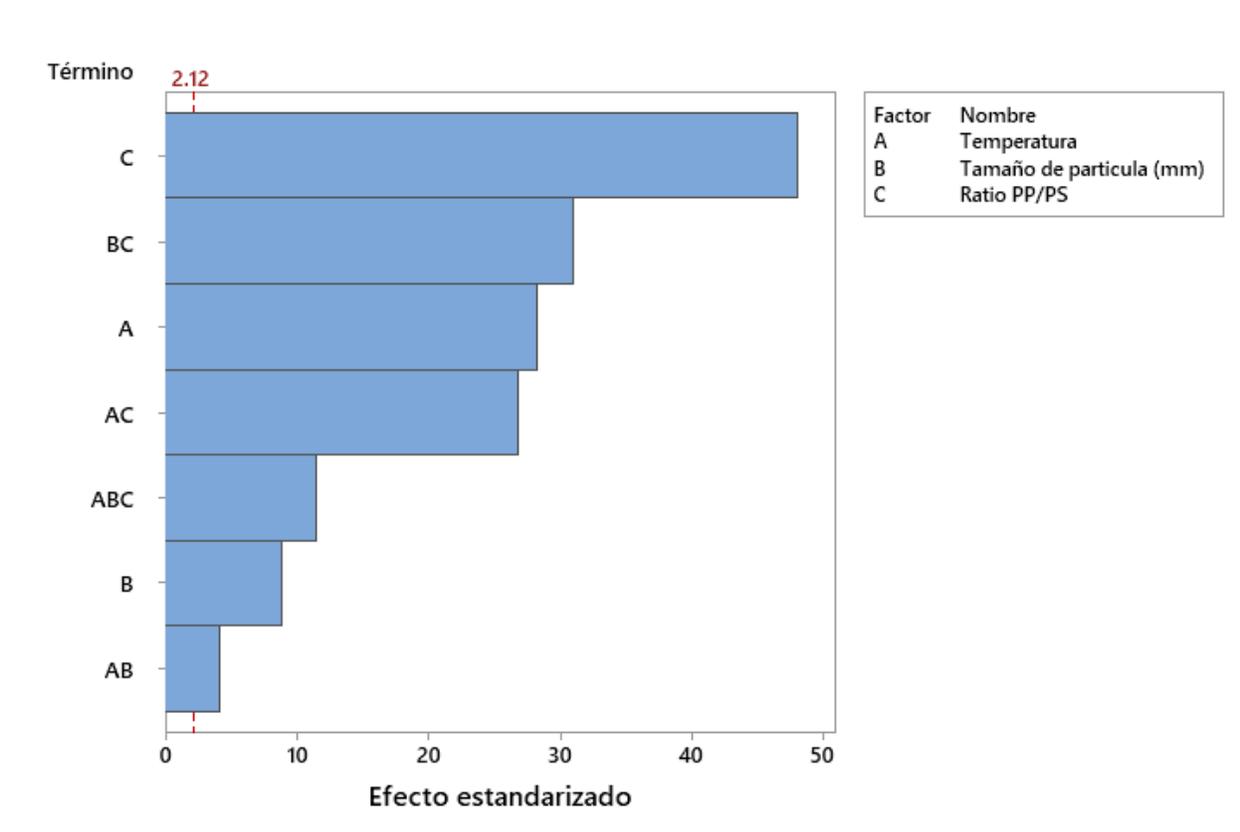
Puesto que el valor de F, es superior al valor de $F_c = 2.12$, obtenido a través de tablas, se presenta la condición de $F \geq F_c$, la cual da a conocer la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre cada uno de los factores. Además, el valor de $p\text{-valué} \leq 0.05$ es otro indicativo de que todas las variables consideradas afectan el rendimiento de líquidos.

Dándose por aceptada la hipótesis alternativa y afirmándose que al menos un factor afecta el rendimiento de líquidos pirolíticos.

Con un análisis de Pareto, se procedió a valorar grado de influencia de los factores. Como se observa en la Figura 21 el factor con mayor efecto es ratio de mezcla PP/PS.

Figura 21

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados, respuesta en % líquidos



Los efectos significativos son C, BC, A, AC, ABC, B y AB, en ese orden de importancia.

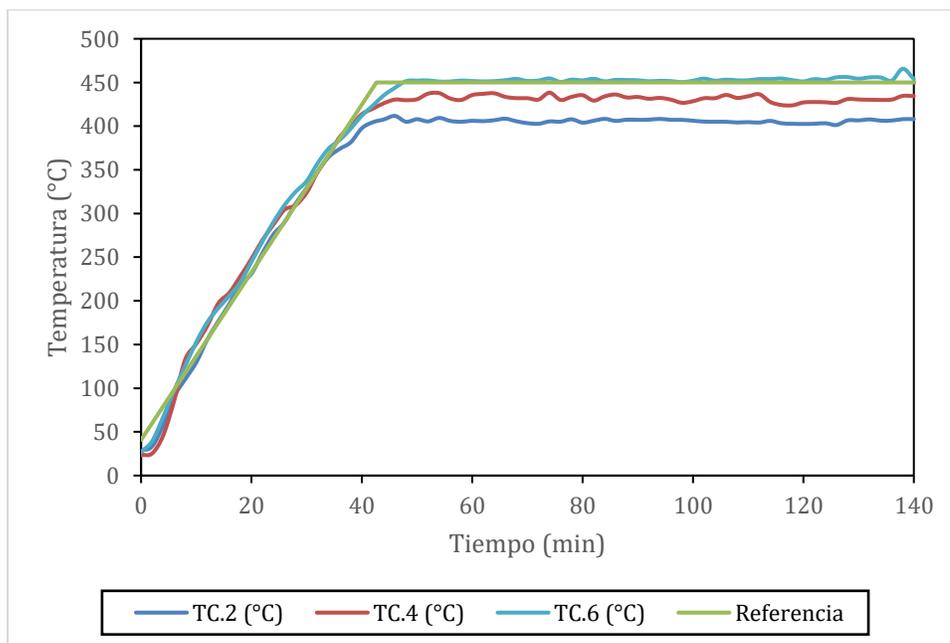
4.4. Perfil de temperatura

La velocidad de calentamiento experimentada fue de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$, además durante el proceso de calentamiento se monitorearon el amperaje de cada resistencia debido que a la degradación del plástico consume energía en forma de calor, y requieren un mayor flujo de calor al momento de la temperatura de pirólisis.

Como se observa en la figura 22, el perfil de temperatura en el interior del reactor medido con tres termocuplas: TC.2, TC.4 y TC.6; las cuales se encontraban en la parte inferior, medio y superior del reactor.

Figura 22

Perfil de Temperatura durante la Pirólisis Térmica a 450°C de la Mezcla PP/PS



Durante la pirólisis, se observó que a comienzos de la etapa transitoria la temperatura se mantuvo estable debido a que el reactor aún se encontraba frío, conforme va calentando, la transferencia de calor disminuye el tiempo muerto de respuesta en el proceso y se alcanza las

temperaturas del perfil de calentamiento teórico. Una vez alcanzado este punto, se disminuye la potencia de las resistencias para mantener el perfil de calentamiento. Alcanzada la etapa estacionaria a los 415 y 450°C, hasta finalizar la pirólisis.

Sabiendo que, en el trabajo realizado por Hartulistiyoso et al. (2015), quien realizó la pirólisis de residuos plásticos de botellas de bebida, a una temperatura de 450°C y una distancia de 0.19 m entre cada termopar tipo K, observaron un delta constante de 50°C a 60°C entre termopares cuando no había craqueo térmico de los plásticos, y además observaron un delta constante de 20°C cuando ocurría el craqueo térmico. De acuerdo a la presente investigación, para las mismas condiciones de temperatura y distancia similares entre: el termopar 2, el termopar 4 y el termopar 6. Se obtuvo un delta en la zona inferior de 20°C y para la parte superior un delta de 25°C. Este valor de 25 °C de delta en la parte superior se debe, a que el reactor utilizado en el presente trabajo de investigación tenía una altura de 40 cm en comparación con el bibliográfico de 1 m de alto.

4.5. Análisis físico-químico de la fracción líquida

De manera general, según Riazi (2005) las propiedades a granel: densidad, gravedad específica e índice de refracción, son elegidas por su elevada precisión al momento de realizar sus mediciones y facilidad para ser medidas directamente de la mezcla de petróleo.

En la presente investigación el análisis fisicoquímico se realizó con equipos que operen bajo las normas ASTM, para medir:

- Densidad, se utilizó el viscosímetro Stabinger SVM300; el cual opera con la norma ASTM D2270

- Índice de Refracción, se utilizó el refractómetro portable 30PX; el cual opera con la norma ASTM D1218.

Para el cálculo de la gravedad específica se utilizó la Ec. 1, para el intercepto de refractividad se utilizó la Ec. 3.

Con esta data recopilada en la sección 4.6, se calculó la composición de parafinas, naftenos y aromáticos, presentes en la fracción líquida.

4.5.1. Resultados de la medición de densidad e índice de refracción

En la Tabla 15, se muestran los resultados densidad e índice de refracción de la fracción líquida obtenida.

Tabla 15

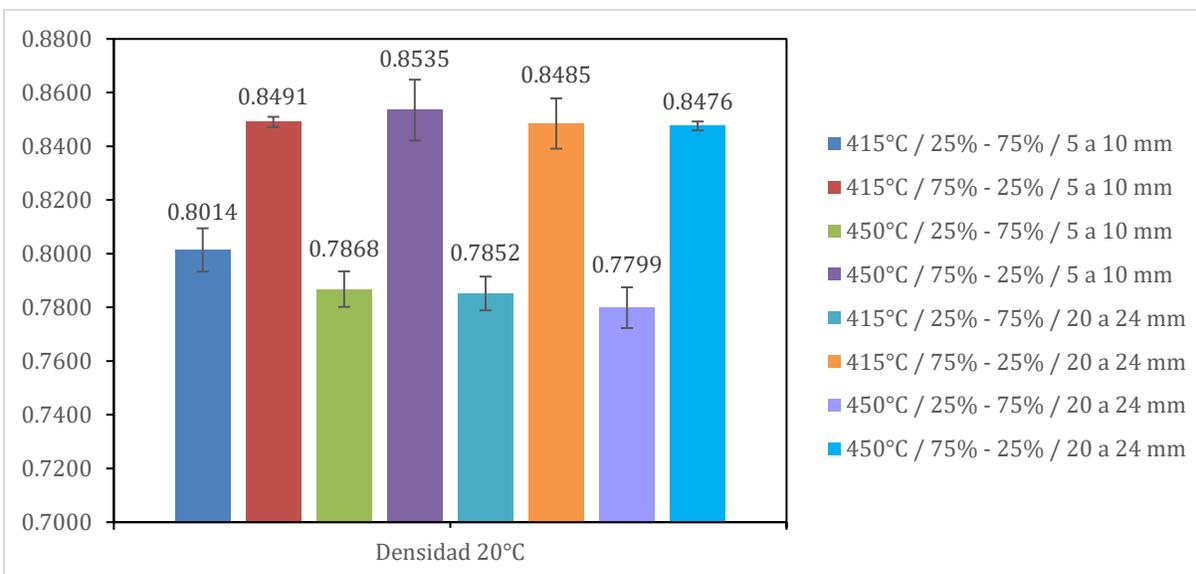
Mediciones de la densidad e índice de refracción de los líquidos pirolíticos obtenidos

Temperatura (°C)	Ratio de Mezcla PS / PP	Tamaño de partícula (mm)	Densidad 20°C g/cm ³	Índice Refracción 20 °C
415	1:3	5 a 10	0.8014	1.4555
415	3:1	5 a 10	0.8491	1.4836
450	1:3	5 a 10	0.7868	1.4486
450	3:1	5 a 10	0.8535	1.4845
415	1:3	20 a 24	0.7852	1.4502
415	3:1	20 a 24	0.8485	1.4833
450	1:3	20 a 24	0.7799	1.4450
450	3:1	20 a 24	0.8476	1.4830

Asimismo, en las Figuras 23 y 24 se muestran los gráficos obtenidos con los resultados de la Tabla 15 para la densidad e índice de refracción de los líquidos obtenidos respectivamente.

Figura 23

Densidad de líquidos pirolíticos obtenidos PP/PS



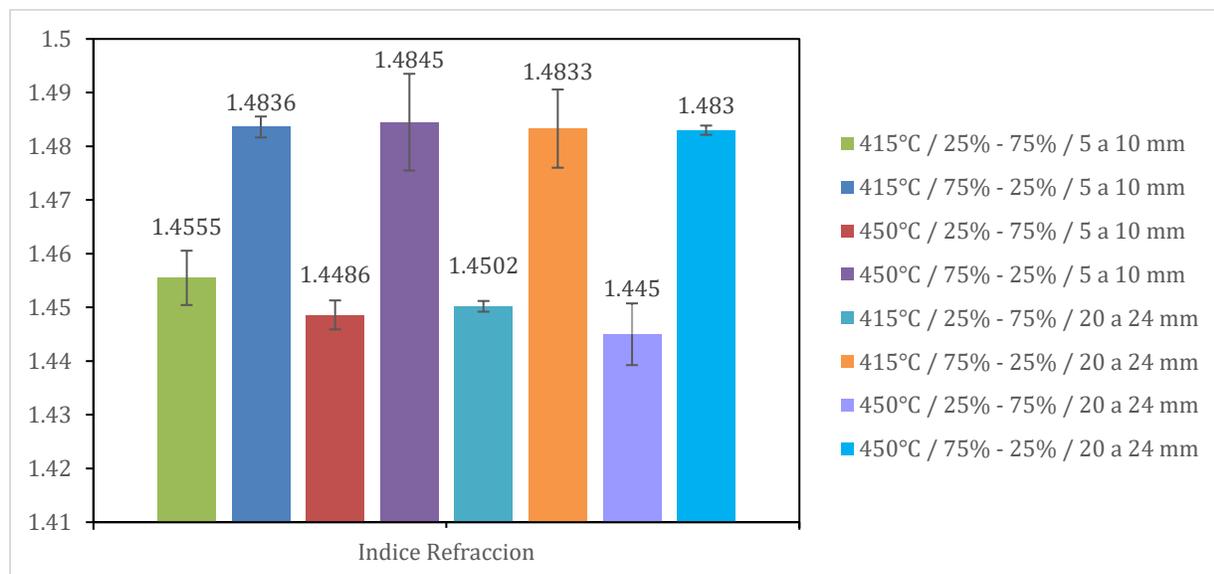
De la Figura 22 se observa que la densidad es diferente entre dos grupos. Los que tienen ratios de mezcla diferentes. A mayor cantidad de PP en la alimentación, mayor es la densidad del líquido obtenido y a mayor cantidad de PS, menor es la densidad del líquido obtenido.

Por otro lado, también se observa que no existen diferencias significativas cuando cambia la temperatura ni el tamaño de partícula.

En base a lo observado, se realiza 2 afirmaciones: primero se afirma que la temperatura y el tamaño de partícula no están directamente relacionados con la densidad de la fracción líquida y segundo, se afirma que solo el ratio de mezcla de la alimentación está directamente relacionada con la densidad de los líquidos pirolíticos.

Figura 24

Índice de refracción de líquidos pirolíticos PP/PS



De la Figura 23, se observa que el índice de refracción es diferente entre dos grupos donde se aprecia un valor alto y bajo. El principal factor dominante sería la composición de alimentación. A mayor cantidad de PP en la alimentación, menor es el índice de refracción del líquido obtenido y a mayor cantidad de PS, mayor es el índice de refracción del líquido obtenido.

Por otro lado, también se observa que no existen diferencias significativas cuando cambia la temperatura ni el tamaño de partícula.

En base a lo observado, se realiza 2 afirmaciones: primero se afirma que la temperatura y el tamaño de partícula no están directamente relacionados con el índice de refracción de la fracción líquida y segundo, se afirma que solo el ratio de mezcla de la alimentación está directamente relacionada con el índice de refracción de los líquidos pirolíticos obtenidos.

4.5.2. Resultados del Intercepto de Refractividad

La data de índice de refracción y la densidad son necesarias para establecer un parámetro conocido como el Intercepto de Refractividad, el cual es un factor de caracterización de fracciones de petróleo.

En la Tabla 16, se muestran los valores de intercepto de refractividad calculados a partir de la Ec.3.

Tabla 16

Intercepto de refractividad de líquidos pirolíticos obtenidos

Temperatura (°C)	Ratio de Mezcla PP / PS	Tamaño de partícula (mm)	Intercepto de Refractividad
415	"3/1"	5 a 10	1.0548
415	"1/3"	5 a 10	1.0591
450	"3/1"	5 a 10	1.0552
450	"1/3"	5 a 10	1.0578
415	"3/1"	20 a 24	1.0576
415	"1/3"	20 a 24	1.0591
450	"3/1"	20 a 24	1.0551
450	"1/3"	20 a 24	1.0592

Según Riazi (2005) el intercepto de refractividad establece rangos para parafinas, naftenos y aromáticos los cuales se presentan en la tabla 16. De acuerdo con los datos medidos en índice de refracción y densidad y convertidos a intercepto de refractividad por la ec. (3) nuestro valor está en el rango de 1.055 a 1.059 en promedio para cada muestra de fracción líquida obtenida. Debido a la cercanía del valor de Ri obtenidos a los valores teóricos en las parafinas y aromáticos se presentaron en mayor cantidad dentro de la fracción líquida, homólogo

a esto en el caso de los naftenos su valor R_i es lejano y por ende se presentaron en menor cantidad dentro de la fracción líquida.

4.5.3. Resultados de la medición de destilación al vacío de la fracción líquida

La destilación ASTM D1160 realizada en el laboratorio de hidrocarburos, no contiene la suficiente información para convertirla en una curva TBP utilizando las correlaciones ASTM.

Por lo tanto, según Y. A. Liu (2018) estos datos se pueden ajustar a un modelo de distribución logarítmica normal con dos parámetros de ajuste μ y δ ; para obtener estimaciones de los puntos de datos faltantes y así poder determinar la curva de destilación en la secuencia: ASTM D1160 a presión de vacío, ASTM D1160 a presión atmosférica, TBP a presión atmosférica y la ASTM D86 a presión atmosférica.

En la Tabla 17, se presenta los datos obtenidos de la destilación ASTM D1160 realizada a presión de vacío.

Tabla 17

Destilación ASTM D1160 de la fracción líquida obtenida

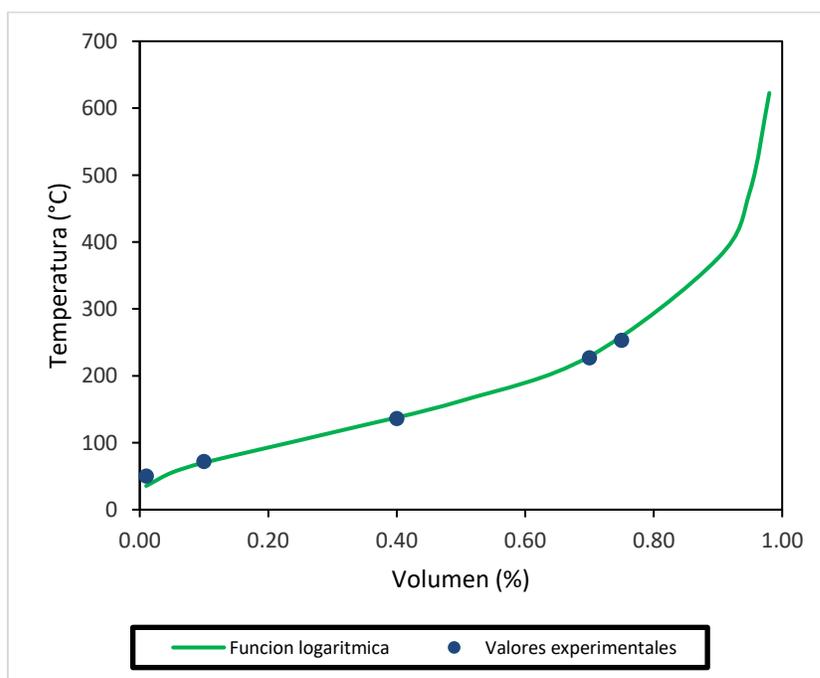
% Volumen Recuperado	Temperatura Balón (°C)	Temperatura Columna (°C)
P.I.	34	81
5	95	81
10	98	87
15	100	90
20	102	91
25	105	93
30	108	94
40	116	98
50	130	104
60	179	116
70	255	215
80	277	227

A partir de los datos de la tabla 17, y el uso de las Ec. 4,5 y 6; se calculo los parámetros μ de 5.090954 y δ de 0.653875. A partir de estos parámetros se paso a extrapolar la curva de destilación incompleta para cubrir el total de rangos de puntos de ebullición.

En la Figura 25, se muestra como los datos de la ASTM D1160 a presión de vacío se comparan con la distribución logarítmica normal con dos parámetros de ajuste.

Figura 25

Curva de destilación ASTM D1160 y una función logarítmica normal



De la Figura 24, se observa que el modelo extrapoliación de curva de destilación es aceptado, conforme a la minimización de la sumatoria del error 1 y error 2 mediante una hoja de cálculo Excel.

En la tabla 18, se observa los datos de destilación: ASTM D1160 a 68 mm Hg, ASTM D1160 a 760 mm Hg, TBP a 760 mm Hg y la ASTM D86 a 760 mm Hg, convertidas a partir de

inter conversiones de ASTM creadas por (Kiran Pashikanti, 2008) y para convertir curvas de destilación sub atmosférica a atmosférica se utilizó el método de (Ai-Fu & Jan, 2009).

Tabla 18

Curva de destilación ASTM D1160, TBP y ASTM D86

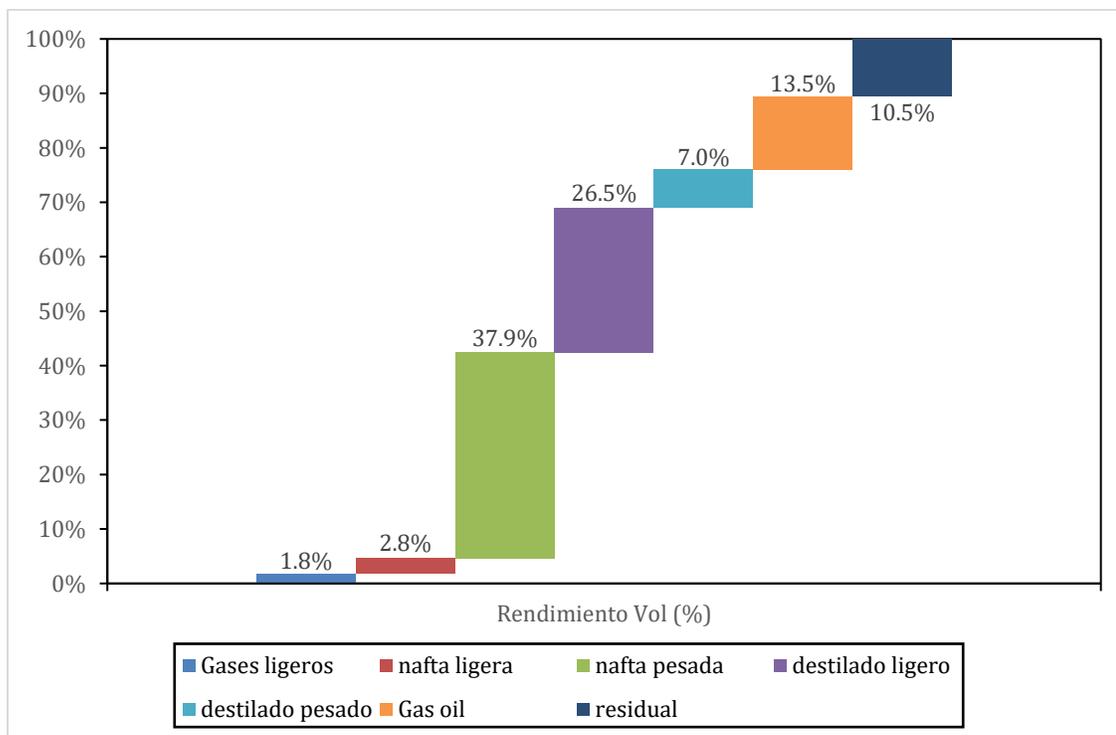
Volumen %	D1160 68 mm Hg	D1160 atm 760 mm Hg	TBP atm 760 mm Hg	ASTM D86 760 mm Hg
10	70.3	142.1	136.2	160.5
30	115.4	193.8	190.8	197.0
50	162.5	247.3	247.3	241.6
70	229.0	321.5	321.8	312.1
90	375.8	481.1	482.4	543.6

Para convertir curvas de destilación ASTM D1160 de 68 mm Hg a ASTM D1160 a 760 mm Hg se usó el método de (Ai-Fu & Jan, 2009). Obtenidos los datos de la curva ASTM D1160 a 760 mm Hg, se aplican las correlaciones estándar ASTM documentadas por (Kiran Pashikanti, 2008) para estimar las curvas: TBP a 760 mm Hg y la ASTM D86 a 760 mm Hg.

En la Figura 26 y Figura 27 realizado con los datos de las curvas de destilación, podemos observar los rendimientos de productos de la fracción de petróleo en base a la ASTM D86.

Figura 26

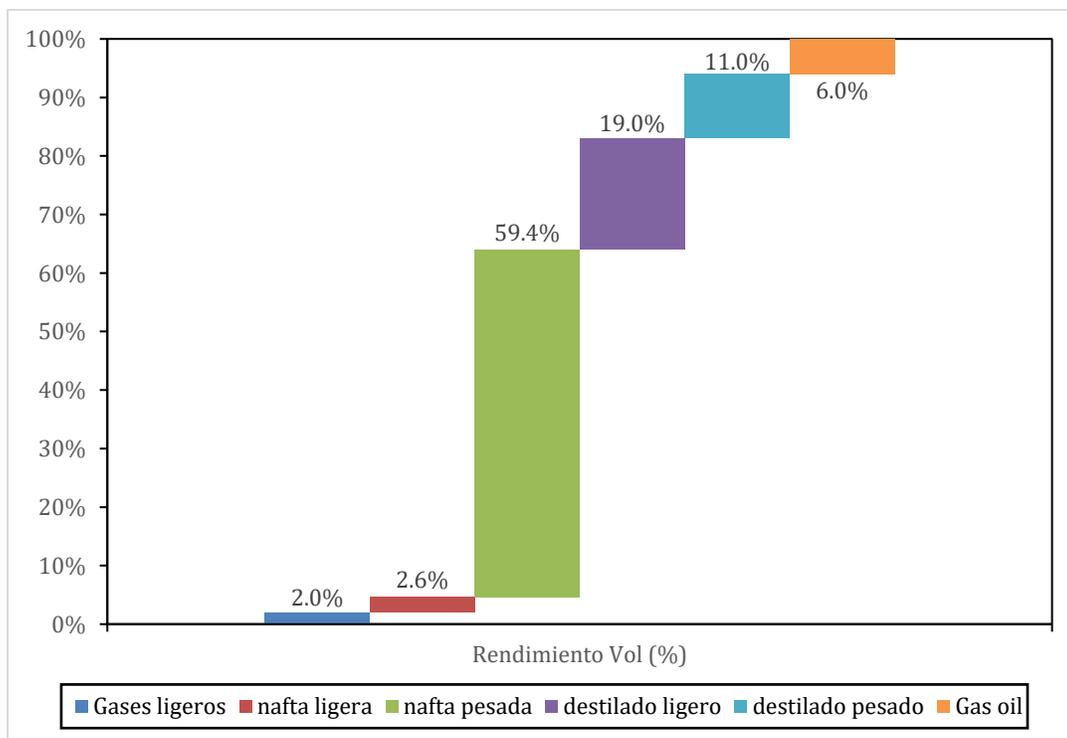
Rendimiento de productos usando la ASTM D86 para un ratio PP/PS 1:3



De la Figura 25, se observa que se tiene una mayor presencia de nafta pesada (37.9%). De este corte se pueden obtener productos comerciales como solventes y gasolina comercial; como segundo producto se tiene el destilado ligero (26.5%). De este corte salen productos comerciales como el combustible de aviación y Diesel. Además, se aprecia un corte de residual (10.5%), como el producto más pesado.

Figura 27

Rendimiento de productos usando la ASTM D86 para un ratio PP/PS 3:1



De la Figura 26, se observa que se tiene una mayor cantidad de nafta pesada (37.9%). De esta nafta pesada salen productos comerciales como solventes y gasolina comercial, como segundo producto se tiene el destilado ligero (19%). De este corte salen productos comerciales como el combustible de aviación y Diesel. Además, se aprecia un corte de gas oíl (6%), como el producto más pesado.

Teniendo en cuenta a Abdel-Aal et al., (2015), quien especificó los productos típicos de una unidad de destilación de crudo y sus productos comerciales. Y los productos de la tabla 4 se infiere que el producto más producido sería la nafta.

4.6. Análisis de composición de la fracción líquida

Primero se validaron los pesos moleculares ≤ 200 a partir de la ecuación 2. Después se calculó el parámetro “m” y la gravedad específica con las ecuaciones 3 y 1 respectivamente.

Finalmente se utilizaron las ecuaciones 5, 6 y 7 del método API (Riazi-Daubert) para el cálculo de la composición de parafinas, naftenos y aromáticos.

4.6.1. Resultados del cálculo de Parafinas, Naftenos y Aromáticos

En la tabla 19, se presenta las composiciones en porcentaje de parafinas, naftenos y aromáticos presentes en la fracción líquida obtenida de la pirólisis térmica.

Tabla 19

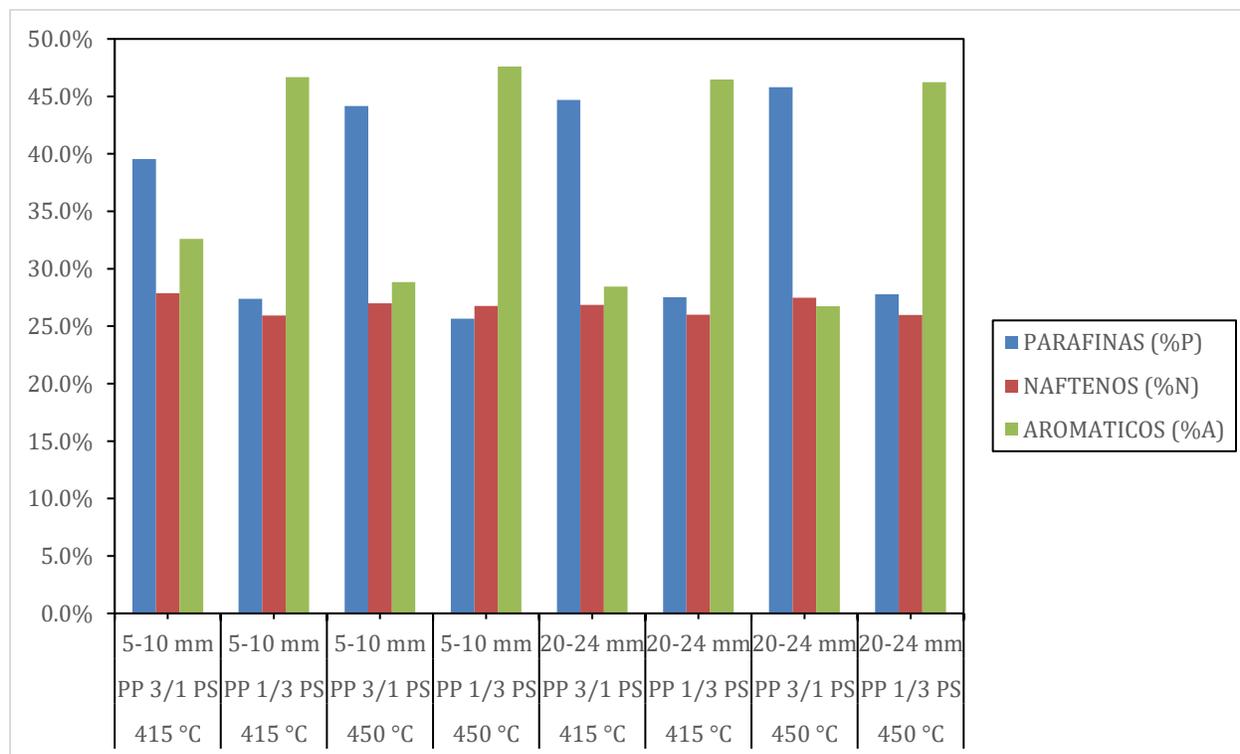
Parafinas, Naftenos y Aromáticos presentes en la fracción líquida

PRUEBA	Temperatura (°C)	Ratio de Mezcla PP : PS	Tamaño de partícula (mm)	x _p	x _n	x _a
P1	415	"3:1"	5 a 10	39.5%	27.9%	32.6%
P2	415	"1:3"	5 a 10	27.4%	25.9%	46.7%
P3	450	"3:1"	5 a 10	44.2%	27.0%	28.8%
P4	450	"1:3"	5 a 10	25.7%	26.8%	47.6%
P5	415	"3:1"	20 a 24	44.7%	26.8%	28.5%
P6	415	"1:3"	20 a 24	27.5%	26.0%	46.5%
P7	450	"3:1"	20 a 24	45.8%	27.5%	26.7%
P8	450	"1:3"	20 a 24	27.8%	26.0%	46.2%

Como se observa en la Figura 28 realizada a partir de la tabla 19, la sumatoria de composiciones el total presente en la fracción líquida.

Figura 28

Distribución de la composición de Parafinas, Naftenos y Aromáticos en la fracción líquida



Así mismo para comparar los datos, en las tablas 20 y 21 se presenta las propiedades fisicoquímicas y porcentaje de parafinas, naftenos y aromáticos presentes en una refinería de petróleo y las obtenidas en promedio el presente trabajo de investigación.

Tabla 20

Cuadro comparativo de propiedades fisicoquímicas y composición de PNA

Combustible	Gravedad Específica	Peso Molecular	Índice de refracción	Densidad (g/cm ³)	Parafinas Vol. %	Naftenos Vol. %	Aromáticos Vol. %
Refinería*	0.799	159	1.445	0.771	51.2%	35.9%	9.6%
Pirólisis PP:PS / 3:1	0.792	184	1.405	0.788	43.6%	27.2%	29.2%

(* Tomado de Y. A. Liu, 2018)

Se afirma que el contenido de PP está directamente relacionado del contenido de Parafinas.

Teniendo en cuenta a Liu et al. (2018), quien trabajó con un kerosene que tiene especificaciones según la tabla 20. De acuerdo a la presente investigación para la fracción líquida se obtuvo pesos moleculares de 175 a 190, contenido de parafinas del 39.5% a 45.8%, naftenos 26% a 27.9%, aromáticos 26.7% a 32.6%. El elevado peso molecular obtenido se debería a la presencia de hidrocarburos pesados, los cuales se encuentran en la fracción de residual mostrado, en los rendimientos líquidos de productos en la figura 25.

Tabla 21

Cuadro comparativo de propiedades fisicoquímicas y composición de PNA

Combustible	Gravedad Específica	Peso Molecular	Índice de refracción	Densidad (g/cm³)	Parafinas Vol. %	Naftenos Vol. %	Aromáticos Vol. %
Refinería*	0.850	157	1.475	0.82	15.9%	45.4%	19.9%
Pirólisis PP:PS / 1:3	0.854	147.8	1.484	0.85	27.1%	26.2%	46.8%

(* Tomado de Y. A. Liu, 2018)

Se afirma que el contenido de PS está directamente relacionado del contenido de aromáticos.

Teniendo en cuenta a Liu et al., (2018), quien trabajó con un kerosene que tiene especificaciones según la tabla 21. De acuerdo a la presente investigación, para la fracción líquida se obtuvo un peso molecular de 142 a 152, contenido de parafinas del 25.7% a 27.8%, naftenos 25.9% a 26.8%, aromáticos 46.2% a 46.7%. Estas diferencias de peso molecular se deben a que la fracción líquida obtenida contiene bajo contenido de naftenos. Además, la

diferencia entre el contenido de aromáticos en refinería y la fracción líquida obtenida de pirólisis se debe al contenido de aromáticos presente en la composición los plásticos utilizados.

4.6.2. Análisis estadístico

Hipótesis planteada:

Ho: Al menos un factor no afecta el contenido de parafinas en la fracción líquida

H1: Al menos un factor afecta el contenido de parafinas en la fracción líquida

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Estadístico de prueba: Análisis factorial de 3 factores y 2 niveles

Para el análisis estadístico se utilizó el software Minitab 19, considerando la relación existente entre las variables: Temperatura, Tamaño de partícula y Ratio de mezcla PP/PS; sobre el contenido de parafinas en la fracción líquida. De acuerdo con esto se obtuvieron los resultados expuestos a continuación.

El modelo obtenido en Minitab 19 es:

$$\begin{aligned} \text{Parafinas\%} &= 0.4276 - 0.000412 \text{ Temperatura} - 0.1236 \text{ Ratio} \\ &\quad - 0.1287 \text{ Tamaño de partícula} \\ &\quad + 0.000428 \text{ Temperatura*Ratio} \\ &\quad + 0.000309 \text{ Temperatura*Tamaño de partícula} \\ &\quad + 0.1348 \text{ Ratio*Tamaño de partícula} \\ &\quad - 0.000303 \text{ Temperatura*Ratio*Tamaño de partícula} \end{aligned}$$

En la tabla 22, se presenta el resumen de R^2 , los datos obtenidos para un diseño experimental de 3 factores y 2 niveles.

Tabla 22*Datos de resumen del modelo*

S	R ² .	R ² . (ajustado)	R ² . (predeterminado)
0.0034003	99.92%	99.85%	99.67%

En la Tabla 23, se presenta el ANOVA, valores F, P-values; de la presente tesis.

Tabla 23*Análisis de varianza (ANOVA)*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	0.113218	0.016174	1398.93	0.000
Lineal	3	0.110273	0.036758	3179.26	0.000
Temperatura	1	0.000446	0.000446	38.61	0.000
Ratio	1	0.108009	0.108009	9341.98	0.000
Tamaño de partícula	1	0.001817	0.001817	157.17	0.000
Interacciones de 2 términos	3	0.002143	0.000714	61.79	0.000
Temperatura*Ratio	1	0.001598	0.001598	138.17	0.000
Temperatura*Tamaño de partícula	1	0.000190	0.000190	16.45	0.004
Ratio*Tamaño de partícula	1	0.000356	0.000356	30.75	0.001
Interacciones de 3 términos	1	0.000802	0.000802	69.39	0.000
Temperatura*Ratio*Tamaño de partícula	1	0.000802	0.000802	69.39	0.000
Error	8	0.000092	0.000012		
Total	15	0.113311			

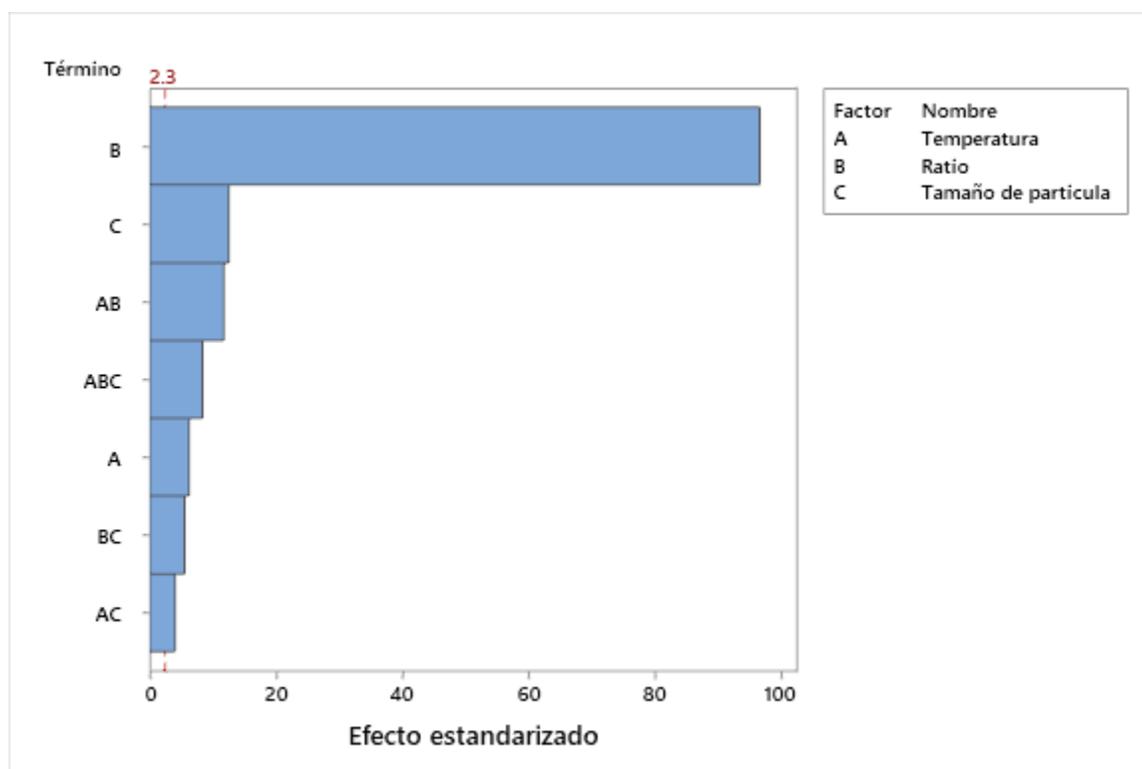
Puesto que el valor de F, es superior al valor de $F_t = 2.3$, obtenido a través de tablas, se presenta la condición de $F \geq F_c$, la cual da a conocer la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre cada uno de los factores. Además, el valor de $p\text{-value} \leq 0.05$ es otro indicativo de que todas las variables consideradas afectan el contenido de parafinas.

Dándose por aceptada la hipótesis alternativa y afirmándose que al menos un factor afecta el contenido de parafinas en la fracción líquida.

Con un análisis de Pareto, se procedió a valorar grado de influencia de los factores. Como se observa en la Figura 29, el factor con mayor efecto es el ratio de mezcla PP/PS.

Figura 29

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados, respuesta en % parafinas



Los efectos significativos son B, C, AB, ABC, A, BC y AC, en ese orden de importancia.

CONCLUSIONES

- Se ha determinado que el ratio de alimentación PP/PS, la temperatura y el tamaño de partícula tienen un efecto significativo en el rendimiento de los líquidos pirolíticos obtenidos. De acuerdo con el diagrama de Pareto obtenido, los efectos significativos ordenados de mayor a menor son:
 - Ratio de alimentación PP/PS
 - Ratio de alimentación y tamaño de partícula
 - Temperatura
 - Temperatura y ratio de alimentación PP/PS
 - Temperatura, ratio de alimentación PP/PS y tamaño de partícula
 - Tamaño de partícula
 - Temperatura y tamaño de partícula
- Se ha determinado que el ratio de alimentación PP/PS, la temperatura y el tamaño de partícula tienen un efecto significativo en el contenido de parafinas de los líquidos pirolíticos obtenidos. De acuerdo con el diagrama de Pareto obtenido, el factor dominante es el ratio de alimentación PP/PS, para mayor PP se obtendrá mayor cantidad de parafinas.

RECOMENDACIONES

- Realizar la pirólisis catalítica para la mezcla de plásticos usada en la presente investigación y comparar el rendimiento de líquidos, sólidos y gases obtenidos.
- Realizar la pirolisis con diferentes mezclas de plásticos como el polietileno de baja y alta densidad (LDPE y HDPE) y determinar los rendimientos de líquido, sólido y gas que se obtengan.
- Evaluar la interacción de otras variables que afectan la pirólisis tales como: velocidad de calentamiento, presión, entre otras y ver su efecto en el rendimiento de productos obtenidos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmad, I., Ismail Khan, M., Khan, H., Ishaq, M., Tariq, R., Gul, K., & Ahmad, W. (2015). Pyrolysis study of polypropylene and polyethylene into premium oil products. *International Journal of Green Energy*, 12(7), 663–671. <https://doi.org/10.1080/15435075.2014.880146>
- Anuar Sharuddin, S. D., Abnisa, F., Wan Daud, W. M. A., & Aroua, M. K. (2016). A review on pyrolysis of plastic wastes. *Energy Conversion and Management*, 115, 308–326. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.037>
- Bao, S. F. (2020). *DISEÑO DE EXPERIMENTOS : DISEÑO FACTORIAL*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Basu, P. (2013). *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory (Segunda Ed). <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07564-6>
- Bulege, W. (2013). Crecimiento demográfico y cambio climático. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 03(01), 4–5. <https://doi.org/10.18259/acs.2013001>
- Campos Lapa, C. A., & Tenazoa Armas, F. (2018). *Combustibles fuel-oil obtenidos de residuos plásticos mediante pirólisis, PUCALLPA – UCAYALI, 2018*. Universidad César Vallejo. Retrieved from <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/32380>
- Chin, B. L. F., Yusup, S., Al Shoaibi, A., Kannan, P., Srinivasakannan, C., & Sulaiman, S. A. (2014). Kinetic studies of co-pyrolysis of rubber seed shell with high density polyethylene. *Energy Conversion and Management*, 87, 746–753. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.043>
- Ciliz, N. K., Ekinci, E., & Snape, C. E. (2004). Pyrolysis of virgin and waste polypropylene and its mixtures with waste polyethylene and polystyrene. *Waste Management*, 24(2), 173–181.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2003.06.002>

Conesa, J. A. (1996). *ESTUDIO DE LA PIRÓLISIS DE RESIDUOS PLÁSTICOS DE POLIETILENO Y NEUMÁTICOS USADOS*. Universidad de Alicante. Universidad de Alicante. Retrieved from <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/17030>

Demirbas, A. (2004). Pyrolysis of municipal plastic wastes for recovery of gasoline-range hydrocarbons. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 72(1), 97–102.

<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2004.03.001>

Fakhrhoseini, S. M., & Dastanian, M. (2013). Predicting pyrolysis products of PE, PP, and PET using NRTL activity coefficient model. *Journal of Chemistry*, 2013, 7–9.

<https://doi.org/10.1155/2013/487676>

Fernandez, Y., Arenillas, A., & Angel, J. (2011). Microwave Heating Applied to Pyrolysis. *Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials*.

<https://doi.org/10.5772/13548>

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made - Supplementary Information. *Science Advances*, 3(7), 19–24.

<https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

Global Plastics Outlook. (2022). OECD. <https://doi.org/10.1787/de747aef-en>

Harper, C. A., & Petrie, E. M. (2004). *Plastics materials and processes - a concise encyclopedia*. *IEEE Electrical Insulation Magazine* (Vol. 20). JOHN WILEY & SONS, INC.

<https://doi.org/10.1109/mei.2004.1318854>

Hernandez Sampieri, R., Fernandez Collado, C., & Baptista Lucio, M. del P. (2014).

Metodología de la Investigación. Mexico D.F.: McGraw-Hill.

INEI. (2021). Cantidad promedio diaria de residuos sólidos recolectados, según departamento,

2020. Retrieved from <https://m.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/c-residuos-10291/>
- Liu, Y., Fu, W., Liu, T., Zhang, Y., & Li, B. (2022). Microwave pyrolysis of polyethylene terephthalate (PET) plastic bottle sheets for energy recovery. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 161(January), 105414. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105414>
- López, A., de Marco, I., Caballero, B. M., Laresgoiti, M. F., & Adrados, A. (2011). Influence of time and temperature on pyrolysis of plastic wastes in a semi-batch reactor. *Chemical Engineering Journal*, 173(1), 62–71. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.07.037>
- Maier, C., & Calafut, T. (1998). Polypropylene: The Definitive User's Guide and Databook. William Andrew.
- Mamani, N. (2022). Cusco: Las calles se llenan de basura debido a una protesta. Retrieved July 25, 2022, from <https://rpp.pe/peru/cusco/cusco-las-calles-se-llenan-de-basura-debido-a-una-protesta-fotos-y-videos-noticia-1385712>
- Mastral, F. J., Esperanza, E., García, P., & Juste, M. (2002). Pyrolysis of high-density polyethylene in a fluidised bed reactor. Influence of the temperature and residence time. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 63(1), 1–15. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(01\)00137-1](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(01)00137-1)
- Mat-Shayuti, M. S., Abdullah, M. Z., & Megat-Yusoff, P. S. M. (2016). THERMAL properties and morphology of Polypropylene/Polycarbonate/Polypropylene-Graft-Maleic anhydride blends. *MATEC Web of Conferences*, 69. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20166903001>
- McKeen, L. W. (2016). Introduction to Fatigue of Plastics and Elastomers. In *Fatigue and Tribological Properties of Plastics and Elastomers* (pp. 1–26). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-44201-5.00001-0>
- MINAM. (2012). *Informe anual de residuos sólidos municipales y no municipales en el Perú*

- Gestión 2012. Ministerio del Ambiente*. Retrieved from <https://redrrss.minam.gob.pe/material/20140423145035.pdf>
- Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y análisis de experimentos*. Limusa Wiley (Segunda).
- Morocho, S. (2019). *Obtención de combustible mediante pirólisis térmica a partir de polipropileno reciclado*. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO. Retrieved from <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/13804/1/96T00569.pdf>
- Nisar, J., Ali, G., Shah, A., Iqbal, M., Khan, R. A., Sirajuddin, ... Akhter, M. S. (2019). Fuel production from waste polystyrene via pyrolysis: Kinetics and products distribution. *Waste Management*, 88, 236–247. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.035>
- Onwudili, J. A., Insura, N., & Williams, P. T. (2009). Composition of products from the pyrolysis of polyethylene and polystyrene in a closed batch reactor: Effects of temperature and residence time. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 86(2), 293–303. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2009.07.008>
- Ramos, W., & Pretell, V. (2021). Obtaining Liquid Fuels from High Density Polyethylene Waste. *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology, 2021-July*, 1–8. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.94>
- Rawi, F. M., Suhaimi, N. F., & Jaapar, K. (2018). Characterization of Polystyrene with TGA/DSC and FESEM/EDX. *Technical Support Bulletin Faculty of Engineering.*, August 4-5.
- Rejas, L., Carreón, B., Ortiz, M., Llanes, L., & Copa, M. (2015). Generación de combustibles Líquidos a partir de residuos plásticos. *Ciencia, Tecnología e Innovación*, 635–642. Retrieved from http://www.scielo.org.bo/pdf/rcti/v10n11/v10n11_a05.pdf
- Ryberg, M. W., Hauschild, M. Z., Wang, F., Averous-Monnery, S., & Laurent, A. (2019). Global

- environmental losses of plastics across their value chains. *Resources, Conservation and Recycling*, 151(March), 104459. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104459>
- Sahin, S., & Yayla, P. (2005). Effects of testing parameters on the mechanical properties of polypropylene random copolymer. *Polymer Testing*, 24(5), 613–619. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2005.03.002>
- Saldivar, E., & Vivaldo, E. (2013). *Handbook of Polymer Synthesis, Characterization, and Processing*. JOHN WILEY & SONS, INC. <https://doi.org/doi:doi.org/10.1002/9781118480793>
- SINIA. (2022). *Reporte Estadístico Departamental*. Retrieved from <https://sinia.minam.gob.pe/informacion/tematicas?tematica=08>
- Solis, M., & Silveira, S. (2020). Technologies for chemical recycling of household plastics – A technical review and TRL assessment. *Waste Management*, 105, 128–138. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.038>
- Vargas Vilca, M. M. (2020). *EVALUACIÓN DE LA PIRÓLISIS TÉRMICA Y DE LA CATALÍTICA USANDO ZEOLITAS VOLCÁNICAS COMO CATALIZADOR DE DESECHOS PLÁSTICOS*. Retrieved from <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12773/12336/MDzutoma.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Wang, J., Yu, Z., Li, P., Ding, D., Zheng, X., Hu, C., ... Wu, C. (2019). Poly(styrene-*co*-cinnamic acid) (SCA), an approach to modified polystyrene with enhanced impact toughness, heat resistance and melt strength. *RSC Advances*, 9(68), 39631–39639. <https://doi.org/10.1039/c9ra08635h>
- Wypych, G. (2016). *Handbook of Polymers. Handbook of Thermoplastics: Second Edition*

(Second Edi). ChemTec Publishing.

Zambrano Bonilla, M. E. (2021). *Obtencion De Combustible a Partir De La Pirolisis Termica De Mezclas De Polipropileno Y Poliestireno Reciclados.*

APÉNDICE

Apéndice 1. Datos de rendimiento de la fracción líquida obtenida en la pirólisis térmica

Tabla 24

Rendimiento de la fracción líquida para una alimentación PP/PS 3:1

Temperatura	Partícula	Repetición	Repetición	Repetición
	mm	1	2	3
415	5 - 10	86.17%	86.16%	86.35%
415	20 - 24	85.50%	85.83%	85.60%
450	5 - 10	87.6%	87.80%	87.90%
450	20 - 24	84.6%	84.31%	84.20%

Tabla 25

Rendimiento de la fracción líquida para una alimentación PP/PS 1:3

Temperatura	Partícula	Repetición	Repetición	Repetición
°C	mm	1	2	3
415	5 - 10	77.50%	77.64%	77.97%
415	20 - 24	80.5%	80.80%	80.60%
450	5 - 10	81.83%	82.00%	82.22%
450	20 - 24	85.83%	86.55%	86.64%

Apéndice 2. Reporte de ensayo

REPORTE DE ENSAYO N° 0001 - 1003			
			Fecha: 13/04/2023
1. INFORMACION GENERAL			
1.1 Sección de Laboratorio: Analisis Fisico Quimico		1.2 N° de orden de trabajo: 0001-23	
1.3 Codigo de muestra: 1003-23			
2. ENSAYOS Y RESULTADOS OBTENIDOS			
N°	ENSAYOS REALIZADOS	METODO DE ENSAYO APLICADO	DATOS OBTENIDOS
2.1	Destilacion °C (a 68.53 mmHg)	ASTM D1160	
	Punto inicial (°C)		50
	5% Recuperado (°C)		58
	10% Recuperado (°C)		72
	15% Recuperado (°C)		82
	20% Recuperado (°C)		90
	25% Recuperado (°C)		97
	30% Recuperado (°C)		105
	40% Recuperado (°C)		136
	50% Recuperado (°C)		164
	60% Recuperado (°C)		190
	70% Recuperado (°C)		227
	75% Recuperado (°C)		253
	80% Recuperado (°C)		286
2.2	Densidad a 20°C	ASTM D1218	0.7968
2.3	Indice de refraccion	ASTM D2270	1.4543
3. OBSERVACIONES APLICABLES A LOS ENSAYOS			
Fecha de inicio de ensayos: 21-02-2023			
Coversiones		Nomenclatura	Limites
Datos para incertidumbre			
Condiciones ambientales		Medio de medicion	Otros
P atm= 0.697			
OBSERVACIONES:			
4. REVISION, APROVACION Y AUTORIZACION			
ANALISTA DE LABORATORIO		ANALISTA DE LABORATORIO	
Nombre: Daniel Brayan Ayme Aymi		Nombre: Maria Fernanda Corazao Pimentel	
Firma: 		Firma: 	
Fecha: 13/04/2023		Fecha: 13/04/2023	
Formato: LB-002-1			

REPORTE DE ENSAYO N° 0002 - 23			
			Fecha: 14/04/2023
1. INFORMACION GENERAL			
1.1 Sección de Laboratorio: Analisis Fisico Quimico		1.2 N° de orden de trabajo: 0002-23	
1.3 Codigo de muestra: 1004-23			
2. ENSAYOS Y RESULTADOS OBTENIDOS			
N°	ENSAYOS REALIZADOS	METODO DE ENSAYO APLICADO	DATOS OBTENIDOS
2.1	Destilacion °C (a 68.53 mmHg)	ASTM D1160	
	Punto inicial (°C)		52
	5% Recuperado (°C)		66.2
	10% Recuperado (°C)		72.3
	15% Recuperado (°C)		76.9
	20% Recuperado (°C)		81.3
	25% Recuperado (°C)		85
	30% Recuperado (°C)		90.2
	40% Recuperado (°C)		96.4
	50% Recuperado (°C)		106.5
	60% Recuperado (°C)		123.5
	70% Recuperado (°C)		162
	75% Recuperado (°C)		192
	80% Recuperado (°C)		215
2.2	Densidad a 20°C	ASTM D1218	0.8491
2.3	Indice de refraccion	ASTM D2270	1.4836
3. OBSERVACIONES APLICABLES A LOS ENSAYOS			
Fecha de inicio de ensayos: 21-02-2023			
Coversiones		Nomenclatura	Limites
Datos para incertidumbre			
Condiciones ambientales		Medio de medicion	Otros
P atm= 0.697			
OBSERVACIONES:			
4. REVISION, APROVACION Y AUTORIZACION			
ANALISTA DE LABORATORIO		ANALISTA DE LABORATORIO	
Nombre: Daniel Brayan Ayme Aymi		Nombre: Maria Fernanda Corazao Pimentel	
Firma: 		Firma: 	
Fecha: 14/04/2023		Fecha: 14/04/2023	
Formato: LB-002-1			

<p style="text-align: center;">REPORTE DE ENSAYO N° 0003 - 23</p> <p style="text-align: right;">Fecha: 17/04/2023</p>			
1. INFORMACION GENERAL			
1.1 Sección de Laboratorio: Analisis Fisico Quimico		1.2 N° de orden de trabajo: 0003-23	
1.3 Codigo de muestra: 0104-23			
2. ENSAYOS Y RESULTADOS OBTENIDOS			
N°	ENSAYOS REALIZADOS	METODO DE ENSAYO APLICADO	DATOS OBTENIDOS
2.1	Destilacion °C (a 156 mmHg)	ASTM D1160	
	Punto inicial (°C)		41
	5% Recuperado (°C)		73
	10% Recuperado (°C)		89
	15% Recuperado (°C)		94
	20% Recuperado (°C)		97
	25% Recuperado (°C)		101
	30% Recuperado (°C)		106
	40% Recuperado (°C)		120
	50% Recuperado (°C)		157
	60% Recuperado (°C)		196
	70% Recuperado (°C)		244
	75% Recuperado (°C)		284
	78% Recuperado (°C)		334
2.2	Densidad a 20°C	ASTM D1218	0.7868
2.3	Indice de refraccion	ASTM D2270	1.4486
3. OBSERVACIONES APLICABLES A LOS ENSAYOS			
Fecha de inicio de ensayos: 21-02-2023			
Coversiones		Nomenclatura	Limites
Datos para incertidumbre			
Condiciones ambientales		Medio de medicion	Otros
P atm= 0.697			
OBSERVACIONES:			
4. REVISION, APROVACION Y AUTORIZACION			
ANALISTA DE LABORATORIO		ANALISTA DE LABORATORIO	
Nombre: Daniel Brayan Ayme Aymi		Nombre: Maria Fernanda Corazao Pimentel	
Firma: 		Firma: 	
Fecha: 17/04/2023		Fecha: 17/04/2023	
Formato: LB-002-1			

<p style="text-align: center;">REPORTE DE ENSAYO N° 0004 - 23</p> <p style="text-align: right;">Fecha: 18/04/2023</p>			
1. INFORMACION GENERAL			
1.1 Sección de Laboratorio: Analisis Fisico Quimico		1.2 N° de orden de trabajo: 0004-23	
1.3 Codigo de muestra: 10044-23			
2. ENSAYOS Y RESULTADOS OBTENIDOS			
N°	ENSAYOS REALIZADOS	METODO DE ENSAYO APLICADO	DATOS OBTENIDOS
2.1	Destilacion °C (a 106.52 mmHg)	ASTM D1160	
	Punto inicial (°C)		46
	5% Recuperado (°C)		71
	10% Recuperado (°C)		75
	15% Recuperado (°C)		77
	20% Recuperado (°C)		80
	25% Recuperado (°C)		82
	30% Recuperado (°C)		84
	40% Recuperado (°C)		89
	50% Recuperado (°C)		97
	60% Recuperado (°C)		114
	70% Recuperado (°C)		164
	75% Recuperado (°C)		202
	80% Recuperado (°C)		228
2.2	Densidad a 20°C	ASTM D1218	0.8535
2.3	Indice de refraccion	ASTM D2270	1.4845
3. OBSERVACIONES APLICABLES A LOS ENSAYOS			
Fecha de inicio de ensayos: 21-02-2023			
Coversiones		Nomenclatura	Limites
Datos para incertidumbre			
Condiciones ambientales		Medio de medicion	Otros
P atm= 0.697			
OBSERVACIONES:			
4. REVISION, APROVACION Y AUTORIZACION			
ANALISTA DE LABORATORIO		ANALISTA DE LABORATORIO	
Nombre: Daniel Brayan Ayme Aymi		Nombre: Maria Fernanda Corazao Pimentel	
Firma: 		Firma: 	
Fecha: 18/04/2023		Fecha: 18/04/2023	
Formato: LB-002-1			

<p style="text-align: center;">REPORTE DE ENSAYO N° 0005 - 23</p> <p style="text-align: right;">Fecha: 19/04/2023</p>			
1. INFORMACION GENERAL			
1.1 Sección de Laboratorio: Analisis Fisico Quimico		1.2 N° de orden de trabajo: 0005-23	
1.3 Codigo de muestra: 03045-23			
2. ENSAYOS Y RESULTADOS OBTENIDOS			
N°	ENSAYOS REALIZADOS	METODO DE ENSAYO APLICADO	DATOS OBTENIDOS
2.1	Destilacion °C (a 106.52 mmHg)	ASTM D1160	
	Punto inicial (°C)		44.3
	5% Recuperado (°C)		73
	10% Recuperado (°C)		82
	15% Recuperado (°C)		87
	20% Recuperado (°C)		91
	25% Recuperado (°C)		95
	30% Recuperado (°C)		101
	40% Recuperado (°C)		120
	50% Recuperado (°C)		153
	60% Recuperado (°C)		192
	70% Recuperado (°C)		272
	75% Recuperado (°C)		303
	77% Recuperado (°C)		325
2.2	Densidad a 20°C	ASTM D1218	0.7852
2.3	Indice de refraccion	ASTM D2270	1.4502
3. OBSERVACIONES APLICABLES A LOS ENSAYOS			
Fecha de inicio de ensayos: 21-02-2023			
Coversiones		Nomenclatura	Limites
Datos para incertidumbre			
Condiciones ambientales		Medio de medicion	Otros
P atm= 0.697			
OBSERVACIONES:			
4. REVISION, APROVACION Y AUTORIZACION			
ANALISTA DE LABORATORIO		ANALISTA DE LABORATORIO	
Nombre: Daniel Brayan Ayme Aymi		Nombre: Maria Fernanda Corazao Pimentel	
Firma: 		Firma: 	
Fecha: 19/04/2023		Fecha: 19/04/2023	
Formato: LB-002-1			

REPORTE DE ENSAYO N° 0006 - 23			
			Fecha: 20/04/2023
1. INFORMACION GENERAL			
1.1 Sección de Laboratorio: Analisis Fisico Quimico		1.2 N° de orden de trabajo: 0006-23	
1.3 Codigo de muestra: 31036-23			
2. ENSAYOS Y RESULTADOS OBTENIDOS			
N°	ENSAYOS REALIZADOS	METODO DE ENSAYO APLICADO	DATOS OBTENIDOS
2.1	Destilacion °C (a 106.52 mmHg)	ASTM D1160	
	Punto inicial (°C)		51
	5% Recuperado (°C)		74
	10% Recuperado (°C)		78
	15% Recuperado (°C)		81
	20% Recuperado (°C)		83
	25% Recuperado (°C)		85
	30% Recuperado (°C)		87
	40% Recuperado (°C)		93
	50% Recuperado (°C)		100
	60% Recuperado (°C)		117
	70% Recuperado (°C)		175
	75% Recuperado (°C)		206
	80% Recuperado (°C)		233
2.2	Densidad a 20°C	ASTM D1218	0.8485
2.3	Indice de refraccion	ASTM D2270	1.4833
3. OBSERVACIONES APLICABLES A LOS ENSAYOS			
Fecha de inicio de ensayos: 21-02-2023			
Coversiones		Nomenclatura	Limites
Datos para incertidumbre			
Condiciones ambientales		Medio de medicion	Otros
P atm= 0.697			
OBSERVACIONES:			
4. REVISION, APROVACION Y AUTORIZACION			
ANALISTA DE LABORATORIO		ANALISTA DE LABORATORIO	
Nombre: Daniel Brayan Ayme Aymi		Nombre: Maria Fernanda Corazao Pimentel	
Firma: 		Firma: 	
Fecha: 20/04/2023		Fecha: 20/04/2023	
Formato: LB-002-1			

REPORTE DE ENSAYO N° 0007 - 23			
			Fecha: 21/04/2023
1. INFORMACION GENERAL			
1.1 Sección de Laboratorio: Analisis Fisico Quimico		1.2 N° de orden de trabajo: 0007-23	
1.3 Codigo de muestra: 29037-23			
2. ENSAYOS Y RESULTADOS OBTENIDOS			
N°	ENSAYOS REALIZADOS	METODO DE ENSAYO APLICADO	DATOS OBTENIDOS
2.1	Destilacion °C (a 106.52 mmHg)	ASTM D1160	
	Punto inicial (°C)		40
	5% Recuperado (°C)		70
	10% Recuperado (°C)		83
	15% Recuperado (°C)		87
	20% Recuperado (°C)		93
	25% Recuperado (°C)		95
	30% Recuperado (°C)		100
	40% Recuperado (°C)		117
	50% Recuperado (°C)		159
	60% Recuperado (°C)		194
	70% Recuperado (°C)		239
	75% Recuperado (°C)		279
	80% Recuperado (°C)		
2.2	Densidad a 20°C	ASTM D1218	0.7799
2.3	Indice de refraccion	ASTM D2270	1.445
3. OBSERVACIONES APLICABLES A LOS ENSAYOS			
Fecha de inicio de ensayos: 21-02-2023			
Coversiones		Nomenclatura	Limites
Datos para incertidumbre			
Condiciones ambientales		Medio de medicion	Otros
P atm= 0.697			
OBSERVACIONES:			
4. REVISION, APROVACION Y AUTORIZACION			
ANALISTA DE LABORATORIO		ANALISTA DE LABORATORIO	
Nombre: Daniel Brayan Ayme Aymi		Nombre: Maria Fernanda Corazao Pimentel	
Firma: 		Firma: 	
Fecha: 21/04/2023		Fecha: 21/04/2023	
Formato: LB-002-1			

<p style="text-align: center;">REPORTE DE ENSAYO N° 0008 - 23</p> <p style="text-align: right;">Fecha: 22/04/2023</p>			
1. INFORMACION GENERAL			
1.1 Sección de Laboratorio: Analisis Fisico Quimico		1.2 N° de orden de trabajo: 0008-23	
1.3 Codigo de muestra: 29038-23			
2. ENSAYOS Y RESULTADOS OBTENIDOS			
N°	ENSAYOS REALIZADOS	METODO DE ENSAYO APLICADO	DATOS OBTENIDOS
2.1	Destilacion °C (a 106.52 mmHg)	ASTM D1160	
	Punto inicial (°C)		44
	5% Recuperado (°C)		60
	10% Recuperado (°C)		66
	15% Recuperado (°C)		68
	20% Recuperado (°C)		70
	25% Recuperado (°C)		72
	30% Recuperado (°C)		75
	40% Recuperado (°C)		80
	50% Recuperado (°C)		87
	60% Recuperado (°C)		107
	70% Recuperado (°C)		163
	75% Recuperado (°C)		199
	80% Recuperado (°C)		
2.2	Densidad a 20°C	ASTM D1218	0.8476
2.3	Indice de refraccion	ASTM D2270	1.483
3. OBSERVACIONES APLICABLES A LOS ENSAYOS			
Fecha de inicio de ensayos: 21-02-2023			
Coversiones		Nomenclatura	Limites
Datos para incertidumbre			
Condiciones ambientales		Medio de medicion	Otros
P atm= 0.697			
OBSERVACIONES:			
4. REVISION, APROVACION Y AUTORIZACION			
ANALISTA DE LABORATORIO		ANALISTA DE LABORATORIO	
Nombre: Daniel Brayan Ayme Aymi		Nombre: Maria Fernanda Corazao Pimentel	
Firma: 		Firma: 	
Fecha: 22/04/2023		Fecha: 22/04/2023	
Formato: LB-002-1			

Apéndice 3. Informes de ensayo

INFORME DE ENSAYO N° 0001 - 1003			
			Fecha: 24/04/2023
1 INFORMACION GENERAL			
1.1 Sección de Laboratorio: Analisis Fisico Quimico		1.2 N° de orden de trabajo: 0001-23	
1.3 Codigo de muestra: 1003-23			
2 ENSAYOS Y RESULTADOS OBTENIDOS			
N°	ENSAYOS REALIZADOS	METODO DE ENSAYO APLICADO	AJUSTE DE DATOS
2.1	Destilacion °C (a 68.53 mmHg)	ASTM D1160	FUNC. LOGARITMICA NORMAL
	Punto inicial (°C)	50	35.5
	5% Recuperado (°C)	58	55.4
	10% Recuperado (°C)	72	70.3
	30% Recuperado (°C)	105	115.4
	50% Recuperado (°C)	164	162.5
	70% Recuperado (°C)	227	229
	90% Recuperado (°C)		375.8
	95% Recuperado (°C)		476.5
	98% Recuperado (°C)		622.6
2.2	Densidad a 20°C	ASTM D1218	GRAVEDAD ESPECIFICA
		0.7968	0.8008
2.3	Indice de refraccion	ASTM D2270	INTERCEPTO REFRACTIVIDAD
		1.4543	1.0559
3 OBSERVACIONES A LOS ENSAYOS REALIZADOS			
Fecha de termino de Ensayo Laboratorio 13/04/2023			
Coversiones		Nomenclatura	Limites
Func. Logaritmica normal	mu	μ	5.09095434
Func. Logaritmica normal	delta	δ	0.653874726
Datos para incertidumbre			
Condiciones ambientales		Medio de medicion	Otros
P atm= 0.697			
OBSERVACIONES:			
El presente informe de ensayo se refiere unicamente a la muestra analizada			
4. REVISION, APROVACION Y AUTORIZACION			
ANALISTA DE LABORATORIO		ANALISTA DE LABORATORIO	
Nombre: Daniel Brayan Ayme Aymi		Nombre: Maria Fernanda Corazao Pimentel	
Firma: 		Firma: 	
Fecha: 24/04/2023		Fecha: 24/04/2023	
Formato: LB-002-1			

INFORME DE ENSAYO N° 0002 - 23			
			Fecha: 24/04/2023
1. INFORMACION GENERAL			
1.1 Sección de Laboratorio: Analisis Fisico Quimico		1.2 N° de orden de trabajo: 0002-23	
1.3 Codigo de muestra: 1004-23			
2. ENSAYOS Y RESULTADOS OBTENIDOS			
N°	ENSAYOS REALIZADOS	METODO DE ENSAYO APLICADO	AJUSTE DE DATOS
2.1	Destilacion °C (a 68.53 mmHg)	ASTM D1160	FUNC. LOGARITMICA NORMAL
	Punto inicial (°C)	52	35.5
	5% Recuperado (°C)	66.2	51.1
	10% Recuperado (°C)	72.3	62.2
	30% Recuperado (°C)	90.2	93.4
	50% Recuperado (°C)	106.5	123.8
	70% Recuperado (°C)	162	164.1
	90% Recuperado (°C)		246.4
	95% Recuperado (°C)		299.6
	98% Recuperado (°C)		373.2
2.2	Densidad a 20°C	ASTM D1218	GRAVEDAD ESPECIFICA
		0.8491	0.8533455
2.3	Indice de refraccion	ASTM D2270	INTERCEPTO REFRACTIVIDAD
		1.4836	1.05905
3. OBSERVACIONES APLICABLES A LOS ENSAYOS			
Fecha de termino de Ensayo Laboratorio 14/04/2023			
Coversiones		Nomenclatura	Limites
Func. Logaritmica normal	mu	μ	4.818375604
Func. Logaritmica normal	delta	δ	0.537410241
Datos para incertidumbre			
Condiciones ambientales		Medio de medicion	Otros
P atm= 0.697			
OBSERVACIONES:			
El presente informe de ensayo se refiere unicamente a la muestra analizada			
4. REVISION, APROVACION Y AUTORIZACION			
ANALISTA DE LABORATORIO		ANALISTA DE LABORATORIO	
Nombre: Daniel Brayan Ayme Aymi	Nombre: Maria Fernanda Corzaao Pimentel		
Firma: 	Firma: 		
Fecha: 24/04/2023	Fecha: 24/04/2023		
Formato: LB-002-1			

INFORME DE ENSAYO N° 0003 - 23			
			Fecha: 24/04/2023
1. INFORMACION GENERAL			
1.1 Sección de Laboratorio: Analisis Fisico Quimico		1.2 N° de orden de trabajo: 0003-23	
1.3 Codigo de muestra: 0104-23			
2. ENSAYOS Y RESULTADOS OBTENIDOS			
N°	ENSAYOS REALIZADOS	METODO DE ENSAYO APLICADO	AJUSTE DE DATOS
2.1	Destilacion °C (a 156 mmHg)	ASTM D1160	
	Punto inicial (°C)	41	33.2
	5% Recuperado (°C)	73	53.3
	10% Recuperado (°C)	89	68.7
	30% Recuperado (°C)	106	116.6
	50% Recuperado (°C)	157	168.1
	70% Recuperado (°C)	244	242.3
	90% Recuperado (°C)		411.0
	95% Recuperado (°C)		529.6
	98% Recuperado (°C)		704.5
2.2	Densidad a 20°C	ASTM D1218	GRAVEDAD ESPECIFICA
		0.7868	0.790734
2.3	Indice de refraccion	ASTM D2270	INTERCEPTO REFRACTIVIDAD
		1.4486	1.0552
3. OBSERVACIONES APLICABLES A LOS ENSAYOS			
Fecha de termino de Ensayo Laboratorio 17/04/2023			
Coversiones		Nomenclatura	Limites
Func. Logaritmica normal	mu	μ	5.124423542
Func. Logaritmica normal	delta	δ	0.69775951
Datos para incertidumbre			
Condiciones ambientales		Medio de medicion	Otros
P atm= 0.697			
OBSERVACIONES:			
El presente informe de ensayo se refiere unicamente a la muestra analizada			
4. REVISION, APROVACION Y AUTORIZACION			
ANALISTA DE LABORATORIO		ANALISTA DE LABORATORIO	
Nombre: Daniel Brayan Ayme Aymi	Nombre: Maria Fernanda Corzaao Pimentel		
Firma: 	Firma: 		
Fecha: 24/04/2023	Fecha: 24/04/2023		
Formato: LB-002-1			

INFORME DE ENSAYO N° 0004 - 23			
			Fecha: 24/04/2023
1. INFORMACION GENERAL			
1.1 Sección de Laboratorio: Analisis Fisico Quimico		1.2 N° de orden de trabajo: 0004-23	
1.3 Codigo de muestra: 10044-23			
2. ENSAYOS Y RESULTADOS OBTENIDOS			
N°	ENSAYOS REALIZADOS	METODO DE ENSAYO APLICADO	AJUSTE DE DATOS
2.1	Destilacion °C (a 106.52 mmHg)	ASTM D1160	
	Punto inicial (°C)	46	31.3
	5% Recuperado (°C)	71	46.8
	10% Recuperado (°C)	75	58.0
	30% Recuperado (°C)	84	90.8
	50% Recuperado (°C)	97	123.8
	70% Recuperado (°C)	164	168.7
	90% Recuperado (°C)		263.9
	95% Recuperado (°C)		327.1
	98% Recuperado (°C)		416.6
2.2	Densidad a 20°C	ASTM D1218	GRAVEDAD ESPECIFICA
		0.8535	0.8577675
2.3	Indice de refraccion	ASTM D2270	INTERCEPTO REFRACTIVIDAD
		1.4845	1.05775
3. OBSERVACIONES APLICABLES A LOS ENSAYOS			
Fecha de termino de Ensayo Laboratorio 18/04/2023			
Coversiones		Nomenclatura	Limites
Func. Logaritmica normal	mu	μ	4.818431905
Func. Logaritmica normal	delta	δ	0.590920743
Datos para incertidumbre			
Condiciones ambientales		Medio de medicion	Otros
P atm= 0.697			
OBSERVACIONES:			
El presente informe de ensayo se refiere unicamente a la muestra analizada			
4. REVISION, APROVACION Y AUTORIZACION			
ANALISTA DE LABORATORIO		ANALISTA DE LABORATORIO	
Nombre: Daniel Brayan Ayme Aymi	Nombre: Maria Fernanda Corzaao Pimentel		
Firma: 	Firma: 		
Fecha: 24/04/2023	Fecha: 24/04/2023		
Formato: LB-002-1			

INFORME DE ENSAYO N° 0005 - 23			
			Fecha: 24/04/2023
1. INFORMACION GENERAL			
1.1 Sección de Laboratorio: Analisis Fisico Quimico		1.2 N° de orden de trabajo: 0005-23	
1.3 Codigo de muestra: 03045-23			
2. ENSAYOS Y RESULTADOS OBTENIDOS			
N°	ENSAYOS REALIZADOS	METODO DE ENSAYO APLICADO	AJUSTE DE DATOS
2.1	Destilacion °C (a 106.52 mmHg)	ASTM D1160	
	Punto inicial (°C)	44.3	28.5
	5% Recuperado (°C)	73	48.4
	10% Recuperado (°C)	82	64.2
	30% Recuperado (°C)	101	115.6
	50% Recuperado (°C)	153	173.6
	70% Recuperado (°C)	272	260.9
	90% Recuperado (°C)		469.8
	95% Recuperado (°C)		622.9
	98% Recuperado (°C)		855.7
2.2	Densidad a 20°C	ASTM D1218	GRAVEDAD ESPECIFICA
		0.7852	0.789126
2.3	Indice de refraccion	ASTM D2270	INTERCEPTO REFRACTIVIDAD
		1.4502	1.0576
3. OBSERVACIONES APLICABLES A LOS ENSAYOS			
Fecha de termino de Ensayo Laboratorio 19/04/2023			
Coversiones		Nomenclatura	Limites
Func. Logaritmica normal	mu	μ	5.157006953
Func. Logaritmica normal	delta	δ	0.776587764
Datos para incertidumbre			
Condiciones ambientales		Medio de medicion	Otros
P atm= 0.697			
OBSERVACIONES:			
El presente informe de ensayo se refiere unicamente a la muestra analizada			
4. REVISION, APROVACION Y AUTORIZACION			
ANALISTA DE LABORATORIO		ANALISTA DE LABORATORIO	
Nombre: Daniel Brayan Ayme Aymi		Nombre: Maria Fernanda Corzaao Pimentel	
Firma: 		Firma: 	
Fecha: 24/04/2023		Fecha: 24/04/2023	
Formato: LB-002-1			

INFORME DE ENSAYO N° 0006 - 23			
			Fecha: 24/04/2023
1. INFORMACION GENERAL			
1.1 Sección de Laboratorio: Analisis Fisico Quimico		1.2 N° de orden de trabajo: 0006-23	
1.3 Codigo de muestra: 31036-23			
2. ENSAYOS Y RESULTADOS OBTENIDOS			
N°	ENSAYOS REALIZADOS	METODO DE ENSAYO APLICADO	AJUSTE DE DATOS
2.1	Destilacion °C (a 106.52 mmHg)	ASTM D1160	
	Punto inicial (°C)	51	33.3
	5% Recuperado (°C)	74	49.6
	10% Recuperado (°C)	78	61.4
	30% Recuperado (°C)	87	95.5
	50% Recuperado (°C)	100	129.7
	70% Recuperado (°C)	175	176.2
	90% Recuperado (°C)		274.2
	95% Recuperado (°C)		339.0
	98% Recuperado (°C)		430.4
2.2	Densidad a 20°C	ASTM D1218	GRAVEDAD ESPECIFICA
		0.8485	0.8527425
2.3	Indice de refraccion	ASTM D2270	INTERCEPTO REFRACTIVIDAD
		1.4833	1.05905
3. OBSERVACIONES APLICABLES A LOS ENSAYOS			
Fecha de termino de Ensayo Laboratorio 20/04/2023			
Coversiones		Nomenclatura	Limites
Func. Logaritmica normal	mu	μ	4.865218383
Func. Logaritmica normal	delta	δ	0.584064558
Datos para incertidumbre			
Condiciones ambientales		Medio de medicion	Otros
P atm= 0.697			
OBSERVACIONES:			
El presente informe de ensayo se refiere unicamente a la muestra analizada			
4. REVISION, APROVACION Y AUTORIZACION			
ANALISTA DE LABORATORIO		ANALISTA DE LABORATORIO	
Nombre: Daniel Brayan Ayme Aymi		Nombre: Maria Fernanda Corzaao Pimentel	
Firma: 		Firma: 	
Fecha: 24/04/2023		Fecha: 24/04/2023	
Formato: LB-002-1			

INFORME DE ENSAYO N° 0007 - 23			
			Fecha: 24/04/2023
1. INFORMACION GENERAL			
1.1 Sección de Laboratorio: Analisis Fisico Quimico		1.2 N° de orden de trabajo: 0007-23	
1.3 Codigo de muestra: 29037-23			
2. ENSAYOS Y RESULTADOS OBTENIDOS			
N°	ENSAYOS REALIZADOS	METODO DE ENSAYO APLICADO	AJUSTE DE DATOS
2.1	Destilacion °C (a 106.52 mmHg)	ASTM D1160	
	Punto inicial (°C)	40	30.9
	5% Recuperado (°C)	70	50.3
	10% Recuperado (°C)	83	65.2
	30% Recuperado (°C)	100	112.0
	50% Recuperado (°C)	159	162.9
	70% Recuperado (°C)	239	237.0
	90% Recuperado (°C)		274.2
	95% Recuperado (°C)		339.0
	98% Recuperado (°C)		430.4
2.2	Densidad a 20°C	ASTM D1218	GRAVEDAD ESPECIFICA
		0.7799	0.7837995
2.3	Indice de refraccion	ASTM D2270	INTERCEPTO REFRACTIVIDAD
		1.445	1.05505
3. OBSERVACIONES APLICABLES A LOS ENSAYOS			
Fecha de termino de Ensayo Laboratorio 21/04/2023			
Coversiones		Nomenclatura	Limites
Func. Logaritmica normal	mu	μ	5.093275857
Func. Logaritmica normal	delta	δ	0.714851233
Datos para incertidumbre			
Condiciones ambientales		Medio de medicion	Otros
P atm= 0.697			
OBSERVACIONES:			
El presente informe de ensayo se refiere unicamente a la muestra analizada			
4. REVISION, APROVACION Y AUTORIZACION			
ANALISTA DE LABORATORIO		ANALISTA DE LABORATORIO	
Nombre: Daniel Brayan Ayme Aymi		Nombre: Maria Fernanda Corzaao Pimentel	
Firma: 		Firma: 	
Fecha: 24/04/2023		Fecha: 24/04/2023	
Formato: LB-002-1			

INFORME DE ENSAYO N° 0008 - 23			
			Fecha: 24/04/2023
1. INFORMACION GENERAL			
1.1 Sección de Laboratorio: Analisis Fisico Quimico		1.2 N° de orden de trabajo: 0008-23	
1.3 Codigo de muestra: 29038-23			
2. ENSAYOS Y RESULTADOS OBTENIDOS			
N°	ENSAYOS REALIZADOS	METODO DE ENSAYO APLICADO	AJUSTE DE DATOS
2.1	Destilacion °C (a 106.52 mmHg)	ASTM D1160	
	Punto inicial (°C)	44	25.7
	5% Recuperado (°C)	60	40.1
	10% Recuperado (°C)	66	50.8
	30% Recuperado (°C)	75	83.3
	50% Recuperado (°C)	87	117.3
	70% Recuperado (°C)	163	165.2
	90% Recuperado (°C)		274.2
	95% Recuperado (°C)		339.0
	98% Recuperado (°C)		430.4
2.2	Densidad a 20°C	ASTM D1218	GRAVEDAD ESPECIFICA
		0.8476	0.851838
2.3	Indice de refraccion	ASTM D2270	INTERCEPTO REFRACTIVIDAD
		1.483	1.0592
3. OBSERVACIONES APLICABLES A LOS ENSAYOS			
Fecha de termino de Ensayo Laboratorio 22/04/2023			
Coversiones		Nomenclatura	Limites
Func. Logaritmica normal	mu	μ	4.764693891
Func. Logaritmica normal	delta	δ	0.652529372
Datos para incertidumbre			
Condiciones ambientales		Medio de medicion	Otros
P atm= 0.697			
OBSERVACIONES:			
El presente informe de ensayo se refiere unicamente a la muestra analizada			
4. REVISION, APROVACION Y AUTORIZACION			
ANALISTA DE LABORATORIO		ANALISTA DE LABORATORIO	
Nombre: Daniel Brayan Ayme Aymi	Nombre: Maria Fernanda Corzaao Pimentel		
Firma: 	Firma: 		
Fecha: 24/04/2023	Fecha: 24/04/2023		
Formato: LB-002-1			