



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL**

CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

**OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO, MEDIANTE EL PROCESO DE PIRÓLISIS A
PARTIR DE RESIDUOS PLÁSTICOS**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
Ingeniero Industrial

AUTORES: Mercy Del Carmen Angulo Cotera

Ricardo Cristian Torres Acuña

TUTOR: Ing. Iván Suarez Escobar, PhD

Guayaquil-Ecuador

2023

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Nosotros, Mercy Del Carmen Angulo Cotera con documento de identificación N° 0958400004 y Ricardo Cristian Torres Acuña con pasaporte N° P19887208; manifestamos que: Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 22 de agosto del año 2023

Ateentamente,

Mercy Del Carmen Angulo Cotera

0958400004

Ricardo Cristian Torres Acuña

P19887208

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Mercy Del Carmen Angulo Cotera con documento de identificación N° 0958400004 y Ricardo Cristian Torres Acuña con pasaporte N° P19887208, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del proyecto técnico: "obtención de combustible líquido, mediante el proceso de pirólisis a partir de residuos plásticos" el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: ingeniero industrial , en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 22 de agosto del año 2023

Atentamente,

Mercy Del Carmen Angulo Cotera

0958400004

Ricardo Cristian Torres Acuña


P19887208

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Iván Eduardo Suarez Escobar con documento de identificación N°0909748287, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO, MEDIANTE EL PROCESO DE PIRÓLISIS A PARTIR DE RESIDUOS PLÁSTICOS, realizado por Mercy Del Carmen Angulo Coterá con documento de identificación N° 0958400004 y por Ricardo Cristian Torres Acuña con pasaporte N° P19887208, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 22 de agosto del año 2023

Atentamente,



Ing. Iván Eduardo Suarez Escobar, PhD
0909748287

RESUMEN

En la actualidad debido al gran impacto ambiental que generan los diferentes tipos de plásticos y a la masividad de su uso en los diferentes sectores industriales, se busca implementar metodologías que permitan reducir la contaminación ambiental que generan los plásticos.

La obtención de combustible líquido a partir de residuos plásticos, tiene el propósito de reducir la contaminación generada por los plásticos transformándolos en combustible a través de un proceso de pirolisis. En este proyecto se utilizó como insumos, plásticos de tipo PET (polietilentereftalato) y PP (polipropileno). Para cumplir con tal tarea se empleó un reactor de pirolisis para descomponer químicamente los materiales plásticos y transformarlos en combustible de calidad. El proceso consiste en introducir el plástico al reactor donde es sometido a temperaturas de 400°C para que ocurra la descomposición química. Posteriormente los gases se condensan y se obtiene una fracción líquida de combustible y otra fracción de gases no condensables que serán quemados.

Se analizó la fracción líquida obtenida en base a sus propiedades químicas y fisicoquímicas para así determinar la calidad del combustible obtenido.

Palabras Claves: condensación, combustible líquido, descomposición química, reactor de pirolisis, PET, PP

ABSTRACT

At present, due to the great environmental impact generated by the different types of plastics and the massiveness of their use in the different industrial sectors, it is sought to implement methodologies that reduce the environmental pollution generated by plastics.

Obtaining liquid fuel from plastic waste has the purpose of reducing the pollution generated by plastics by transforming them into fuel through a pyrolysis process. In this project, plastics such as PET (polyethylene terephthalate) and PP (polypropylene) were used as inputs. To fulfill this task, a pyrolysis reactor was used to chemically decompose plastic materials and transform them into quality fuel. The process consists of introducing the plastic to the reactor where it is subjected to temperatures of 400°C for chemical decomposition to occur. Subsequently, the gases are condensed and a liquid fraction of fuel is obtained and another fraction of non-condensable gases that will be burned.

The liquid fraction obtained was analyzed based on its chemical and physicochemical properties in order to determine the quality of the fuel obtained.

Keywords: condensation, liquid fuel, chemical decomposition, pyrolysis reactor, PET, PP

INDICE GENERAL

<i>CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN</i>	<i>I</i>
<i>CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA</i>	<i>II</i>
<i>CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN</i>	<i>III</i>
<i>RESUMEN</i>	<i>V</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>VI</i>
<i>INTRODUCCIÓN</i>	<i>1</i>
<i>CAPÍTULO I</i>	<i>2</i>
EL PROBLEMA	2
1.1 ANTECEDENTES	2
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	3
1.3. JUSTIFICACIÓN	4
1.4. GRUPO OBJETIVO	5
1.5. DELIMITACIÓN	5
1.6. OBJETIVOS	5
<i>CAPÍTULO II</i>	<i>6</i>
MARCO TEÓRICO	6
2.1 POLÍMEROS	6
2.2. ESTRUCTURA MOLECULAR DE LOS POLÍMEROS	8
2.3. ESTRUCTURA QUÍMICA DE LOS POLÍMEROS	11
2.4. PLÁSTICOS	13
2.5. RESIDUOS PLÁSTICOS	18
2.6. MEDIO AMBIENTE	18

2.7. CONTAMINACIÓN AMBIENTAL POR USO DE PLÁSTICO EN ECUADOR _____	21
2.8. PIROLISIS _____	22
2.9. DESTILACIÓN _____	27
2.10. TIPOS DE DESTILACIÓN _____	27
CAPÍTULO III _____	29
MARCO METODOLOGICO _____	29
3. METODOLOGÍA APLICADA _____	29
3.1. HIPÓTESIS Y ESPECIFICACIÓN DE VARIABLES _____	29
3.2. MATERIA PRIMA Y EQUIPOS _____	33
3.3. DISEÑO EXPERIMENTAL _____	44
3.4. DESARROLLO EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE PIRÓLISIS _____	45
3.5. DESARROLLO EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE DESTILACIÓN _____	50
3.6. ANÁLISIS FÍSICO DE LA FRACCIÓN LÍQUIDA OBTENIDA A PARTIR DE LA PIRÓLISIS Y DESTILACIÓN DE LA MUESTRA _____	54
3.7. CALCULO DE REDUCCIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS CON EL PROCESO DE PIRÓLISIS _____	56
CAPÍTULO IV _____	58
ANÁLISIS DE RESULTADOS _____	58
4.1. RESULTADO DE LA PIRÓLISIS TÉRMICA _____	58
4.2. RESULTADO DE LA DESTILACIÓN DE LAS MUESTRAS DE PIRÓLISIS _____	62
4.3. ANÁLISIS ORGANOLÉPTICO _____	69
4.4. RESULTADOS DE DENSIDAD, GRAVEDAD ESPECÍFICA Y GRAVEDAD API _____	72
4.5. REDUCCIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS _____	76
PRESUPUESTO _____	77
CRONOGRAMA _____	77
CONCLUSIONES _____	78

<i>RECOMENDACIONES</i>	<i>80</i>
<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	<i>81</i>
<i>ANEXOS</i>	<i>85</i>

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Clasificación de los plásticos según la SPI</i>	15
<i>Tabla 2. Generación diaria y anual de desechos plásticos en Ecuador</i>	22
<i>Tabla 3. Identificación de las variables que intervienen en el proceso de pirólisis y destilación</i>	30
<i>Tabla 4. Aspectos generales de la metodología aplicada</i>	31
<i>Tabla 5. Aspectos específicos de la metodología aplicada</i>	32
<i>Tabla 6. Tiempos y temperaturas del proceso de destilación de la muestra 1</i>	44
<i>Tabla 7. Tiempos y temperaturas del proceso de destilación de la muestra 2</i>	44
<i>Tabla 8. Tiempo - Temperatura del proceso de pirolisis</i>	58
<i>Tabla 9. Densidades de las fracciones de combustible obtenidas de la muestra 2</i>	73
<i>Tabla 10. Gravedad específica de las fracciones</i>	73
<i>Tabla 11. Gravedad API de la muestra 1 y 2</i>	74
<i>Tabla 12. Gravedad específica y gravedad API del petróleo crudo y productos seleccionados</i>	75
<i>Tabla 13. Reducción de residuos plásticos</i>	76
<i>Tabla 14. Materiales para la construcción del equipo de pirolisis</i>	94
<i>Tabla 15. Materiales para la construcción del equipo de pirolisis</i>	97

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Representación molecular del polietileno</i>	6
<i>Figura 2. Representación desarrollada del polietileno</i>	6
<i>Figura 3. Representaciones de la estructura esquemática de los polímeros</i>	8
<i>Figura 4. Representación semidesarrollada de un polímero lineal</i>	9
<i>Figura 5. Representación semidesarrollada de un polímero ramificado</i>	9
<i>Figura 6. Representación semidesarrollada de un polímero entrecruzado</i>	10
<i>Figura 7. Disposición de las cadenas poliméricas en las fibras</i>	11
<i>Figura 8. Estructura y propiedades de los polímeros</i>	12
<i>Figura 9. Generación diaria de residuos sólidos por subproducto (2022)</i>	21
<i>Figura 10. Adecuación de la materia prima</i>	33
<i>Figura 11. Equipo de pirólisis</i>	34
<i>Figura 12. Controlador de temperatura</i>	36
<i>Figura 13. Recámara térmica-resistencia vitrocerámica</i>	37
<i>Figura 14. Recámara térmica</i>	37
<i>Figura 15. Reactor de pirólisis</i>	38
<i>Figura 16. Condensador</i>	39
<i>Figura 17. Contenedor</i>	40
<i>Figura 18. Equipo de destilación</i>	41
<i>Figura 19. Equipo de medición de grados Api-Densito Mettler Toledo</i>	43
<i>Figura 20. Reactor de pirólisis en funcionamiento</i>	46
<i>Figura 21. Residuos carbonizados después del proceso de pirolisis</i>	47
<i>Figura 22. Equipo de destilación en funcionamiento</i>	51
<i>Figura 23. Temperatura-tiempo del proceso de pirolisis</i>	59
<i>Figura 24. Masa neta de aceite de pirolisis de la muestra 1</i>	60
<i>Figura 25. Masa neta de la muestra2</i>	61
<i>Figura 26. Muestra 1-Fase 1.Temperatura-tiempo</i>	62
<i>Figura 27. Muestra 1-Fase 2. Temperatura-tiempo</i>	63
<i>Figura 28. Muestra 1-Fase 3.Temperatura-tiempo</i>	64

<i>Figura 29. Muestra 2-Fase 1.Temperatura-tiempo</i>	<i>65</i>
<i>Figura 30. Muestra2- Fase2.Temperatura-tiempo</i>	<i>66</i>
<i>Figura 31. ml de aceite de pirolisis de la muestra 1</i>	<i>67</i>
<i>Figura 32. ml de aceite de pirolisis de la muestra 2</i>	<i>68</i>
<i>Figura 33. Muestra1- Aceite de pirolisis obtenido</i>	<i>69</i>
<i>Figura 34. Muestra2-Acite de pirolisis obtenido</i>	<i>70</i>
<i>Figura 35. Muestra1 - Fracciones líquidas de destilación</i>	<i>71</i>
<i>Figura 36. Muestra 2-Fracciones líquidas obtenidas en el proceso de pirolisis</i>	<i>72</i>
<i>Figura 37. Muestras sometidas a análisis</i>	<i>75</i>
<i>Figura 39. Torre de enfriamiento y tapa del reactor</i>	<i>85</i>
<i>Figura 38. Condensador</i>	<i>85</i>
<i>Figura 40. Contenedor de combustible</i>	<i>86</i>
<i>Figura 41. Recámara térmica</i>	<i>86</i>
<i>Figura 42. Manómetro</i>	<i>87</i>
<i>Figura 43. Equipo de pirolisis ensamblado</i>	<i>87</i>

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la conciencia sobre la contaminación causada por los desechos plásticos ha aumentado considerablemente, y la necesidad de encontrar soluciones efectivas se ha vuelto imperante. La obtención de combustible líquido a partir de residuos plásticos mediante pirolisis ofrece una alternativa prometedora para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y aprovechar los recursos no renovables de manera más eficiente.

A medida que la demanda de energía continúa aumentando y los problemas de contaminación por plásticos se intensifican, la obtención de combustible líquido por pirólisis se posiciona como una solución innovadora y prometedora que puede contribuir significativamente a la gestión de los desechos, la reducción de emisiones y el desarrollo de fuentes de energía más sostenibles. Esto es un tema de gran relevancia en la actualidad debido a la creciente preocupación por el manejo adecuado de los desechos plásticos y la búsqueda de alternativas sostenibles para el suministro de combustibles. La pirólisis es una tecnología prometedora que permite transformar los residuos plásticos en combustibles líquidos, como el aceite pirolítico, que pueden utilizarse como una fuente de energía renovable y menos contaminante.

En este sentido, se detalla cómo funciona el proceso de pirolisis, los tipos de residuos plásticos que pueden ser utilizados como materia prima y los beneficios ambientales que ofrece esta tecnología. El tema abordará una solución innovadora para abarcar el problema de la contaminación por plásticos y la dependencia de combustibles fósiles, fomentando una economía circular y sostenible. Este proyecto se centrará en la producción y obtención de combustible líquido y su posterior evaluación de sus características físicas.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 ANTECEDENTES

Una de las principales dificultades a nivel mundial es la sujeción a los combustibles fósiles y sus derivados; si a este problema se le suma la contaminación ambiental generada por la explotación, transformación y uso de sus derivados, es evidente el daño irreversible al medio ambiente y a la subsistencia de la humanidad y de los seres vivos en general (Intriago Molina & Rodríguez Velarde, 2017; Vasquez, Beltrán, Perez, & Espinoza, 2016).

A través de la transformación de los recursos fósiles se obtienen polímeros, los cuales representan el componente principal para la obtención del material plástico; esto conlleva a que el petróleo sea la materia prima de muchas industrias. El plástico, mediante su uso progresivo en las industrias, se ha convertido en un punto crítico a nivel mundial debido a la contaminación que estos generan (Clavijo M & Fárez M, 2018; Vazquez et al., 2016).

Los residuos plásticos de un solo uso representan un problema ambiental por su nivel de contaminación, debido a que, su proceso de degradación es muy lento, así mismo, sus componentes químicos al degradarse dan origen a una fuente importante de gases de efecto invernadero, representando una grave amenaza para los ecosistemas y para todas las especies que habitan en el planeta.

Actualmente casi la totalidad de los productos que se consumen vienen empaquetados, envueltos en diferentes tipos de plásticos, los cuales pasan a formar parte de la basura como residuos; aunque parte de estos son reciclados en polímeros de menor calidad para otros usos, la

mayor parte de estos residuos plásticos pasan a los basureros generando así contaminación ambiental.

Las botellas PET y los recipientes o tapas PP son el tipo de plástico que mayor contaminación genera, ya que, su principal inconveniente es el corto tiempo de vida útil, es decir, al momento en que el producto que contiene el envase es consumido, el plástico (botella, envase, contenedor, etc.) es desechado (Vasquez, 2016).

En este sentido, desde el punto de vista ambiental se ha producido combustible líquido a partir de residuos plásticos mediante el proceso de pirolisis del plástico y su refinamiento a través de la destilación. Este proceso de obtención del combustible ofrece una alternativa limpia y eficiente para el tratamiento y aprovechamiento de los residuos plásticos, lo cual ayudará a reducir la contaminación generada por los mismos y a su vez representará un beneficio ambiental en lugar de contaminar y producir daños irreparables a la naturaleza y al ecosistema.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad el plástico ha reemplazado a otros materiales tradicionales como las cerámicas, maderas y metales en muchas de sus aplicaciones, a ello se debe el aumento de la producción de plástico a nivel mundial (ASEPLAS,2018). Según la Gufa de la Industria Plástica del Ecuador aproximadamente el 50% de productos alimenticios son envasados con artículos de plástico y ayudan a que estos alimentos puedan transportarse con mayor facilidad.

En la economía del Ecuador las industrias plásticas representan uno de los sectores más dinámicos principalmente por la presencia del plástico en las actividades domésticas e industriales lo que conlleva una alta demanda de los productos y consecuentemente una mayor cantidad de

desperdicios plásticos. El consumo de plástico en el Ecuador ha crecido en la presente década de 33 a cerca de 40 kg/hab./año, aún muy por debajo de México, Argentina y Chile que superaron los 150 kg/hab./año, acercándose a los 200 (ASEPLAS, 2022)

Según datos registrados en el informe de gestión del 2022 de la Asociación Ecuatoriana de Plásticos (ASEPLAS) en el año 2021 en Ecuador se procesó 586 mil toneladas de resina PET, 1616 millones de botellas, con un consumo per cápita de 90 bot/hab/año. De las cuales se recuperaron más de 360 mil toneladas, y 354 mil Tn. regresaron a la industria local, exportándose más de 6 mil toneladas como RPET y posteriormente 27 mil como producto terminado.

Se han implementado técnicas para el tratamiento de residuos plásticos, entre ellas, reciclado mecánico el cual permite obtener materias primas secundarias con propiedades fisicoquímicas idénticas a la materia original (Aracil, 2008; Espinoza, 2009), otra de las técnicas es el aprovechamiento energético en donde el plástico es usado como combustible dado su elevado poder calorífico, esta técnica de tratamiento y reciclaje de los residuos plásticos puede constituir una alternativa favorable a la no dependencia a los combustibles fósiles.

1.3. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo se centra en la producción y obtención de combustible líquido de forma experimental mediante el proceso de pirólisis, además de su acondicionamiento mediante el proceso de destilación para evaluar si la fracción líquida posee las características de los combustibles. Considerando lo anteriormente expuesto, para el desarrollo de este proyecto se implementa la pirólisis del plástico la cual consiste en un proceso de descomposición térmica en ausencia de oxígeno con temperaturas comprendidas entre 400° y 1000°C, obteniendo una fracción

gaseosa y líquida aprovechables (Aracil, 2008). Por medio de esta experimentación se producirá combustible líquido, considerando que la producción de este combustible representa una alternativa sostenible ante la dependencia a los combustibles fósiles. Además, mediante la aplicación del proceso de pirolisis se reducirá el volumen de contaminación generada por los desechos plásticos.

1.4. GRUPO OBJETIVO

Este trabajo de experimentación va dirigida a la comunidad académica como aporte de estudio de la producción de combustible a partir de residuos plásticos mediante el proceso de pirolisis.

1.5. DELIMITACIÓN

La experimentación de la pirolisis se realizará en los laboratorios de química, de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil, campus María auxiliadora y Centenario.

1.6. OBJETIVOS

1.6.1. OBJETIVO GENERAL

Obtener combustible líquido, mediante el proceso de pirolisis a partir de residuos plásticos.

1.6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Transformar residuos plásticos mediante el proceso de pirolisis térmica y destilación.
2. Disminuir el nivel de contaminación ambiental generada por los residuos plásticos.
3. Analizar las propiedades físicas de la fracción líquida obtenida mediante la pirolisis y destilación.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 POLÍMEROS

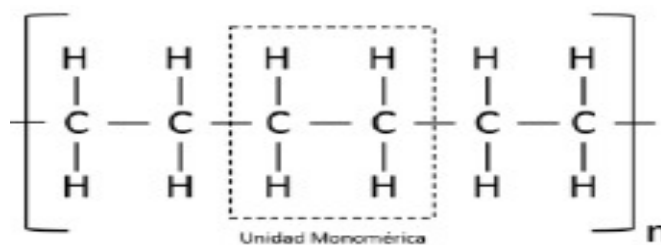
Un polímero es una gran molécula construida por la repetición de pequeñas unidades químicas simples. En algunos casos la repetición es lineal, de forma semejante a como una cadena la forma sus eslabones, en otros casos las cadenas son ramificadas o interconectadas formando retículos tridimensionales, la unidad repetitiva del polímero es usualmente equivalente o casi equivalente al monómero o material de partida del que se forma el polímero (Billmeyer, 2020). El vocablo polímero significa una molécula constituida por la repetición de una unidad más simple: los monómeros que son pequeñas moléculas de las que se parte para formar los polímeros [Del griego: (πολύ) poli = muchos; (μέρος) meros = parte, mono = uno] (Ravve, 2013).

Figura 1. Representación molecular del polietileno



Fuente: Introducción a la ciencia de los

Figura 2. Representación desarrollada del polietileno



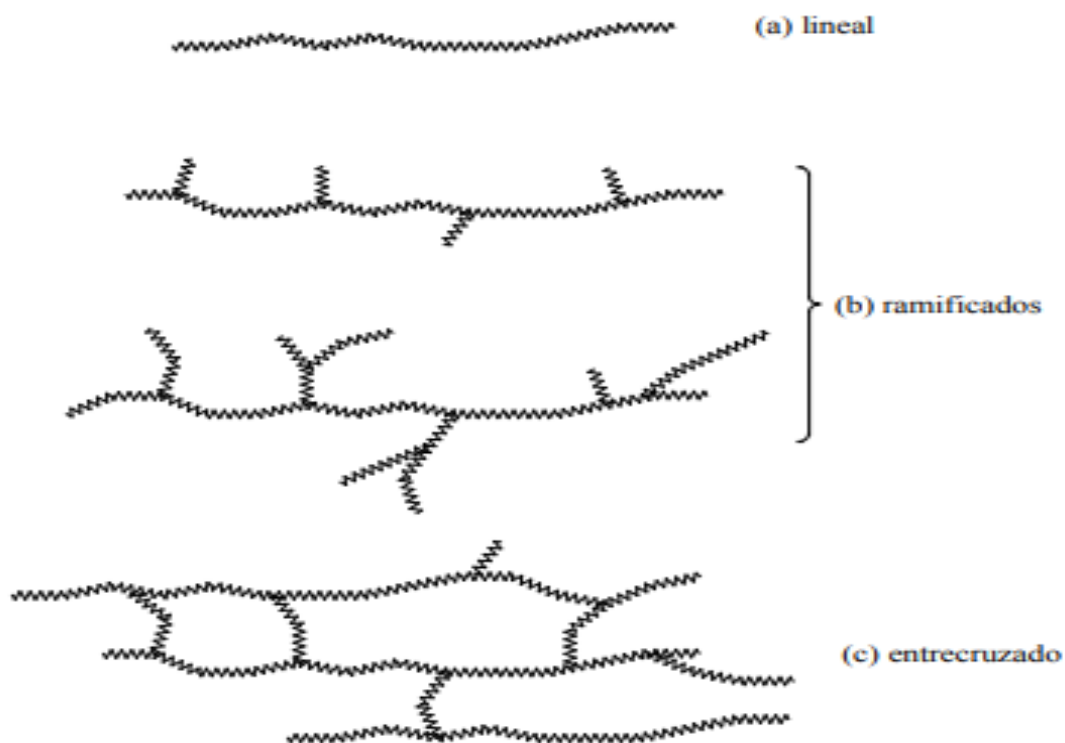
Fuente: Introducción a la ciencia de los polímeros.

Entre las propiedades únicas de los polímeros, se incluye la asociación por su gran tamaño lo que conduce a interacciones considerables por las longitudes considerables a lo largo de la cadena y de grandes superficies. El término polímero incluye a los polímeros naturales y a los sintéticos. Los polímeros sintéticos pueden ser tanto orgánicos como inorgánicos, mientras que los naturales son comúnmente llamados biopolímeros (Carraher, 2013). Los polímeros se utilizan en un gran número de aplicaciones dada su habilidad para fabricar materiales a la medida para satisfacer necesidades específicas. En general el término plásticos nos es familiar y se refiere a polímeros que se utilizan en la fabricación de artículos estructurales. Por ejemplo, el poli-cloruro de vinilo (PVC) que se usa para fabricar tuberías que se utilizan actualmente para plomería. El polietileno y polipropileno se utilizan para producir varios tipos de contenedores, envases y materiales para ductos. Las fibras son usadas en diversas aplicaciones que incluyen a la industria textil y pueden ser producidas a partir de polímeros como el nylon o los poli-ésteres. Los elastómeros o hules tienen su aplicación en llantas, mangueras, cojinetes y empaques, los basados en poliuretano se usan para fabricar suelas en la industria del calzado y la automotriz en fascias y salpicaderas. Los poliuretanos se usan también en la formulación de adhesivos. Las pinturas actuales base agua (en forma de látex) constan de diversos polímeros vinílicos, acrílicos, estirénicos, poliéster y epóxidos, en donde la resistencia al agua es importante. Cabe mencionar que en la industria electrónica los polímeros son utilizados tanto por sus propiedades aislantes como sus propiedades de semiconductores y magnéticas (Lokensgard, 2008).

2.2. ESTRUCTURA MOLECULAR DE LOS POLÍMEROS

La estructura molecular de los polímeros puede ser clasificada como lineal, ramificada o entrecruzada. Las diferencias entre cada tipo, corresponden a diferencias en conformación, un criterio más para clasificar los polímeros (Young and Lovell, 2011). En la figura 1.3 se muestra una representación idealizada de estas estructuras.

Figura 3. Representaciones de la estructura esquemática de los polímeros



Fuente: Full Química.com

- **Polímeros lineales:**

La polimerización ocurre en una sola dirección, por ejemplo, si los monómeros reaccionan solo por extremos.

Figura 4. Representación semidesarrollada de un

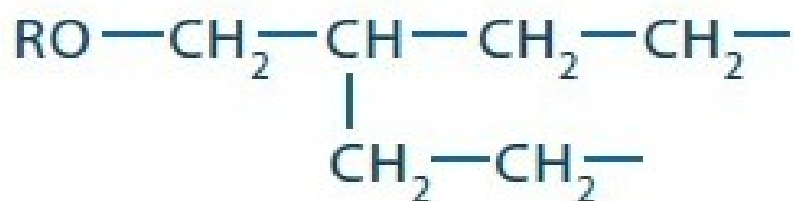


Fuente: Full Química.com

- **Polímeros Ramificados:**

Un monómero no sólo reacciona en los extremos de la cadena, sino que, además, en posiciones intermedias de la cadena.

Figura 5. Representación semidesarrollada de un polímero ramificado

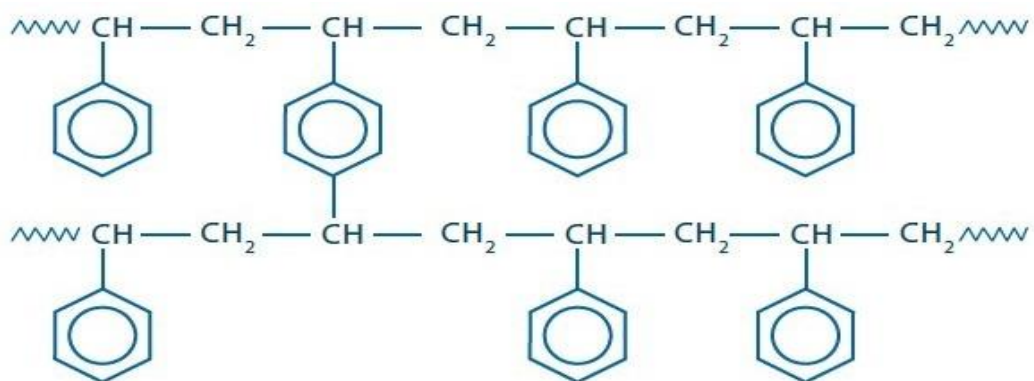


Fuente: Full Química.com

- **Polímeros entrecruzados:**

Dos o más cadenas lineales se unen en distintas partes, formando una especie de enrejado.

Figura 6. Representación semidesarrollada de un polímero entrecruzado



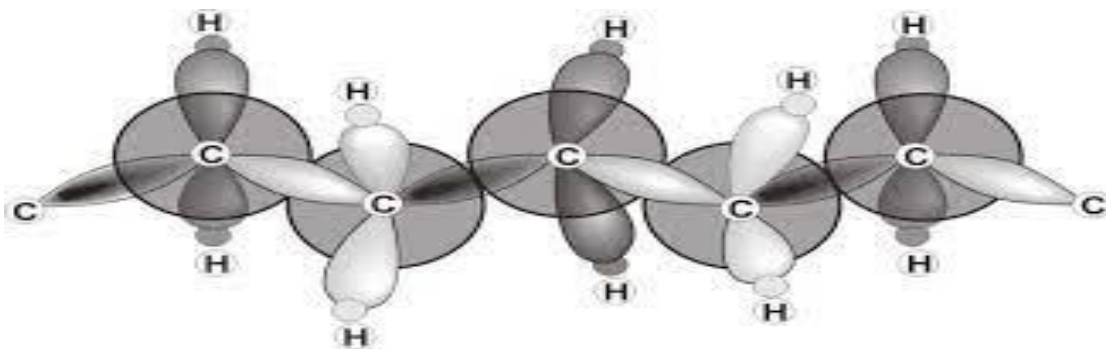
Fuente: Full Química

2.3. ESTRUCTURA QUÍMICA DE LOS POLÍMEROS

2.3.1. TIPO DE ÁTOMOS EN LA CADENA PRINCIPAL Y SUSTITUYENTES

Los átomos de carbono constituyen la cadena principal de los polímeros y presentan una configuración sp^3 , es decir, sus orbitales formarán un tetraedro alrededor del átomo de carbono y el ángulo de enlace de dos carbonos consecutivos será de aproximadamente de 109° (Beltrán & Marcilla, 2011). La figura 9 muestra una parte de la cadena de polietileno.

Figura 7. Disposición de las cadenas poliméricas en las fibras

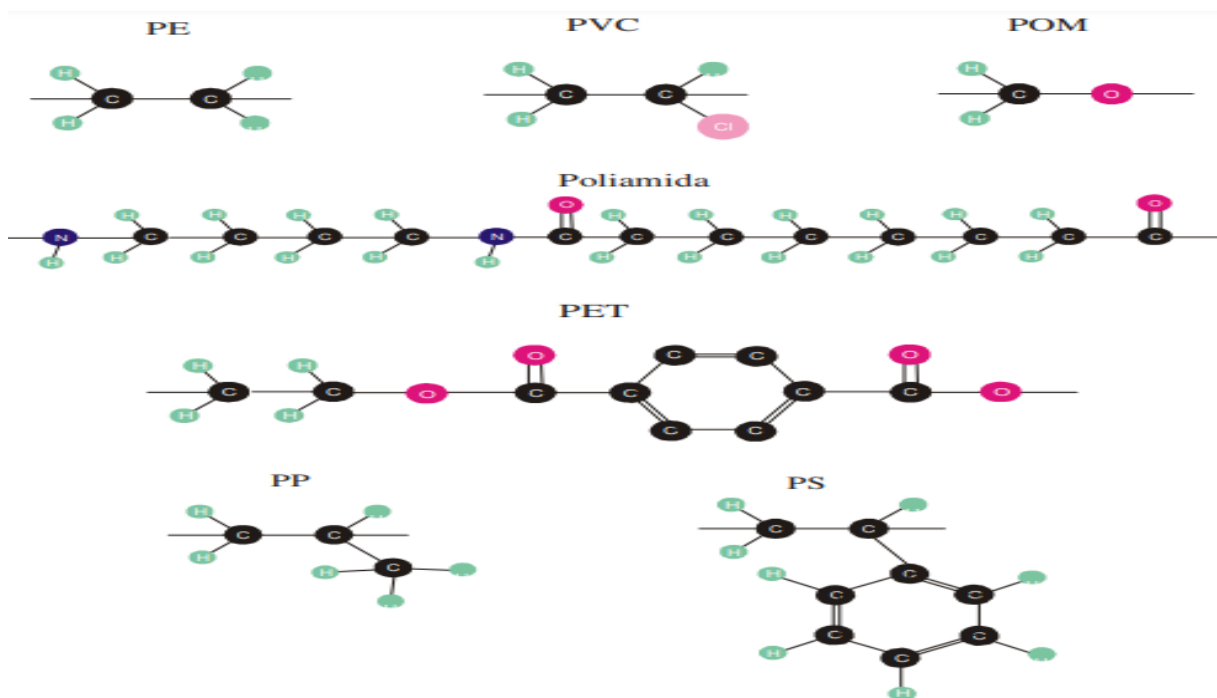


Fuente: Estructura y propiedades de los polímeros

Las fuerzas responsables de la cohesión entre cadenas diferentes pueden tener diversa naturaleza, y ser condicionadas por características de los átomos sustituyentes de la cadena principal. La polaridad y el volumen de los átomos afectarán a las fuerzas de cohesión entre cadenas y a su vez determinarán la flexibilidad del material, temperatura, transición vítrea, temperatura de fusión y capacidad de cristalización, entre otras propiedades. Mientras mayor sea la fuerza de cohesión entre las cadenas, más rígido será el polímero y mayor será la temperatura de fusión en el caso de los polímeros cristalinos o la temperatura de reblandecimiento en el caso de los polímeros no cristalinos. En las poliamidas, por ejemplo, las fuerzas de cohesión entre las moléculas son el

resultado de una combinación de enlaces por puentes de hidrógeno, fuerzas dipolo-dipolo y fuerzas de tipo London, que confiere una elevada temperatura de fusión al polímero. En la figura 2.10 se muestra la estructura de algunos polímeros. En el caso de la molécula de polietileno (PE), molécula sencilla no polar, las cadenas diferentes se atraen entre sí por fuerzas intermoleculares débiles de tipo London (dipolo inducido-dipolo inducido). En consecuencia, el polietileno moléculas polares, tales como PVC, las cadenas se mantienen unidas mediante interacciones fuertes de tipo dipolo-dipolo resultantes de la atracción entre los átomos de cloro de una molécula y los de hidrógeno de otra, lo que resulta un polímero muy rígido, (Beltrán & Marcilla, 2011).

Figura 8. Estructura y propiedades de los polímeros



Fuente: Estructura y propiedades de los polímeros

2.4. PLÁSTICOS

Plástico es el nombre genérico y común que se le da a una serie de sustancias de estructura molecular y características físico-químicas semejantes, cuya característica fundamental es contar con elasticidad y flexibilidad durante un intervalo de temperaturas, permitiendo así su moldeado y adaptación a diversas formas. Este nombre proviene de su eminente plasticidad, es decir, su facilidad para adquirir ciertas formas. La mayoría de los plásticos son, concretamente, materiales sintéticos y derivados del petróleo, obtenidos mediante procesos de polimerización, es decir, procesos de síntesis de largas cadenas de átomos de carbono, que dan origen a una sustancia orgánica maleable en caliente y resistente al frío. También existen plásticos que no son derivados del petróleo, como los plásticos derivados del almidón, la celulosa y ciertas bacterias. Este material es sumamente versátil gracias a su liviandad, tacto agradable y resistencia tanto a la degradación biológica como a la ambiental (excepto por la exposición prolongada a rayos UV en algunos casos), (Álvarez, 2021)

2.4.1. TIPOS DE PLÁSTICOS

Los tipos de plásticos pueden ser clasificados de maneras diferentes. La clasificación propuesta por Crawford (Plastics Engineering, 3rd ed., R. J. Crawford, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1999) que se basa en las propiedades más destacadas desde el punto de vista del diseño de piezas y de selección de materiales para una aplicación determinada. De acuerdo con esta clasificación se describen brevemente los principales tipos de plásticos, su estructura y propiedades y ejemplos de plásticos pertenecientes a cada tipo.

2.4.2. TERMOPLÁSTICOS

Los termoplásticos son considerados como polímeros lineales, que pueden estar ramificados o no, debido a que no se encuentran entrecruzados, son polímeros solubles en algunos disolventes orgánicos y son capaces de fundir y son, por tanto, reciclables. Si se los compara con otros tipos de plásticos, los termoplásticos se fabrican y se emplean en cantidades muy grandes y entre ellos los más frecuentes son PEAD, PEBD, PET, PP, PS, PVC y PC. De hecho, más de la mitad de la cifra total de plásticos procesada corresponde a los cuatro plásticos citados. Para que un polímero tenga aplicación como termoplástico debe

tener una temperatura de transición vítrea T_g (si se trata de un material amorfo), o una temperatura de fusión T_m (si se trata de un material cristalino), superior a la temperatura ambiente. Por lo general, los materiales termoplásticos presentan un buen conjunto de propiedades mecánicas, son fáciles de procesar y bastante económicos. La principal desventaja deriva del hecho de que son materiales que funden, de modo que no tienen aplicaciones a elevadas temperaturas puesto que por encima de la T_g comienzan a reblandecer, con la consiguiente pérdida de propiedades mecánicas, (Beltrán & Marcilla, 2011).

Tabla 1. Clasificación de los plásticos según la SPI

NÚMERO	ABREVIATURA	NOMBRE COMPLETO
1	PET (en inglés PETE)	Polietilentereftalato
2	PE-AD (en inglés HDPE)	Polietileno de alta densidad
3	V, PVC	Vinilo, Policloruro de vinilo
4	PE-BD (en inglés LDPE)	Polietileno de baja densidad
5	PP	Polipropileno
6	PS	Poliestireno
7	Otros	Incluye las demás resinas y los materiales multicapa. Poliuretano (PU). Acrilonitrilo-butadienestireno (ABS). Policarbonato (PC). Biopolímero.

La base del código es un símbolo de forma triangular, integrado por tres flechas (símbolo de reciclaje), con un número específico en el centro que establece el tipo de plástico.

En la mayoría de los envases plásticos del código está marcado en su parte inferior, aplicado por moldeo o impreso por algún otro método.

Fuente: NTE INEN 2633 (2012)

- ***Polietilentereftalato:***

El tereftalato de polietileno o PET, es un material caracterizado por su ligereza y resistencia mecánica a compresión, conserva el sabor y aroma de los alimentos, es una barrera contra los gases, reciclable 100% y con posibilidad de producir envases reutilizables, presenta una demanda creciente en todo el mundo. El PET es el material plástico con el cual se elaboran los envases de bebidas gaseosas y aguas minerales, entre otras. Las botellas son desechables, por lo que su destino

suele ser la bolsa de basura y, por extensión, los rellenos sanitarios donde se depositan los residuos domiciliarios. Según Serrano (2001) la producción de resina para botellas gaseosa tenía un incremento de 11,3% anual en 1999; mientras que la tasa de aumento en el reciclaje de las mismas botellas de PET llegaba a 10,5%. Por otro lado, ese mismo año, el uso de la resina para hacer botellas de agua se estaba incrementando a más del 30%. El PET es producido a partir del petróleo crudo, gas y aire. Un kilo de PET está compuesto por 64% de petróleo, 23% de derivados líquidos del gas natural y 13% de aire. A partir del petróleo crudo, se extrae el paraxileno y se oxida con el aire para dar ácido tereftálico, (Alesmar, Rendón, & Korody, 2008).

- ***Polietileno de alta densidad:***

PEAD o HDPE es un polímero formado por múltiples unidades de etileno. Este tipo de polímero se obtiene por adición, es decir, sumando distintas unidades de etileno. Sus moléculas presentan un nivel reducido de ramificaciones, lo que confiere una densidad molecular considerable, que se traduce en una gran resistencia y dureza, así como mayor tolerancia a las altas temperaturas. Se trata, además de un material muy fácil de procesar mediante métodos como inyección o extrusión. El polietileno de alta densidad es un material reciclable, especialmente mediante reciclaje mecánico y térmico, (S.L, 2018).

- ***Policloruro de Vinilo:***

Según Arapa Lizeth, 2016 este polímero también conocido como PVC es un producto obtenido a partir de la polimerización del monómero de cloruro de vinilo y llega a formarse a Poli cloruro de vinilo. Este producto se obtiene a partir del cloruro de sodio NaCl (57%) y de un petróleo o gas natural en un (43%) siendo así menos dependiente de los recursos plásticos. El PVC es un

derivado del plástico, cuenta con una gran resistencia, tenacidad, ductilidad y resistencia dimensional.

- ***Polietileno de baja densidad:***

Este polímero también conocido como LDPE se comporta como un material altamente flexible y presenta un color natural translúcido. Durante ensayos a la flama presenta facilidad para incendiarse, continúa ardiendo se funde y gotea. Presenta una flama azul con la punta amarilla desprendiendo un olor a parafina y humos de color blanco. Sus principales aplicaciones son películas de empaque, así como el tubo de conduit y de riego, bolsas, recubrimientos de alambres, cables, juguetes y tapas, (Conde, 1992)

- ***Polipropileno:***

También conocido como PP es un material plástico que se obtiene mediante la polimerización del material propileno el cual proviene de la descomposición del petróleo y es clasificado como un derivado gaseoso. El polipropileno es un material plástico, posee altos niveles de rigidez, alta cristalinidad y grado de fusión, (Pérez Porto & Merino, 2015).

- ***Poliestireno:***

También conocido como PS, el poliestireno es un material deformable al someterse a altas temperaturas volviéndose más flexible. Industrialmente es fabricado mediante la polimerización del monómero estireno, este es un hidrocarburo aromático toma su nombre del estoraque, bálsamo que se genera al recoger la resina del árbol de liquidámbar. Este material es totalmente reciclable, sin embargo, el proceso para su reciclaje económicamente no resulta muy rentable por las propiedades y características que lo componen.

- ***Otros tipos de plásticos:***

Estos plásticos no se pueden reciclar debido a que son resultado de mezclas entre otros plásticos, pueden ser reutilizados y hacer con ellos infinidad de manualidades y otros tipos de aprovechamientos. Los plásticos más comunes dentro de este grupo son el policarbonato y el Acrilonitrilo Butadieno Estireno también conocido como ABS, (Juste, Ecología verde, 2020).

2.5. RESIDUOS PLÁSTICOS

John W. Hyatt, Jr. (1865), define que se genera un residuo plástico cuando cualquier tipo de elemento fabricado a partir material plástico es desechado por el consumidor al no encontrarle valor o utilidad post-consumo. Una de las principales características de los residuos plásticos es la larga duración, los tiempos de descomposición dependen del tipo de plástico que se esté tratando, su tamaño y del proceso de degradación.

2.6. MEDIO AMBIENTE

El medio ambiente se refiere al entorno que rodea a los seres vivos y comprende tanto elementos naturales como artificiales. Incluye todo lo que rodea a un organismo o sistema y que influye en su desarrollo, comportamiento y supervivencia. Esto abarca tanto los componentes físicos, como el aire, el agua, el suelo, la flora y la fauna, como los factores biológicos, químicos y sociales que interactúan en un ecosistema. El ambiente provee los recursos para la vida y la producción (alimentos, energía, aire, agua, materiales, tierra) también proporciona el sumidero o lugar de eliminación de los productos de desechos (SERRETO, 2016).

2.6.1. EFECTO DE LOS PLÁSTICOS EN EL ENTORNO AMBIENTAL

El impacto medio ambiental provocado por el plástico es muy agresivo, debido a su lenta degradabilidad y por su composición química; el impacto medio ambiental de los plásticos genera daños a los ecosistemas del mundo entero. El 99% de los plásticos son producidos a partir de los combustibles fósiles, eso genera desgaste en las fuentes de energía no renovables, se estima que 25 millones de toneladas plásticas son acumuladas en el ambiente cada año y permanecen si degradarse por un periodo de entre 100 y 500 años, (Hernández, 2013)

2.6.2. EFECTOS AMBIENTALES A NIVEL MUNDIAL DERIVADOS DE LA ACUMULACIÓN DE DESECHOS PLÁSTICOS

El plástico, en todo el planeta, es el material más contaminante del ambiente y solo el 10% se recicla. El resto va a los mares en forma de basura y micropartículas que limitan la generación de oxígeno en los seres vivos y son el alimento de la fauna marina, (Hidalgo, 2019)

Mendoza (2014), citado por (Alcivar, 2020) señala que a nivel mundial el principal impacto ambiental a nivel mundial de los residuos plásticos es la contaminación de los océanos y mares, es un impacto acumulativo que se presenta a largo plazo y cubre gran cantidad de espacios en todo el planeta. No todos los RP son perceptibles a la vista porque los plásticos se desintegran por las condiciones de exposición al sol y lo que se encuentran es una gran cantidad de fragmentos de este material (Maldonado, 2012). La presencia de los Residuos Plásticos representan una amenaza para la biodiversidad marina. Los animales se enredan con estos y pueden resultar heridos, inmóviles o muertos. los plásticos se terminan fragmentando en el ambiente y como consecuencia pueden ser ingeridos por diferentes especies que los confunden con comida (Maldonado, 2012).

2.6.3.UTILIZACIÓN Y PROCESO DE AGREGAR VALOR A LOS DESECHOS PLÁSTICOS

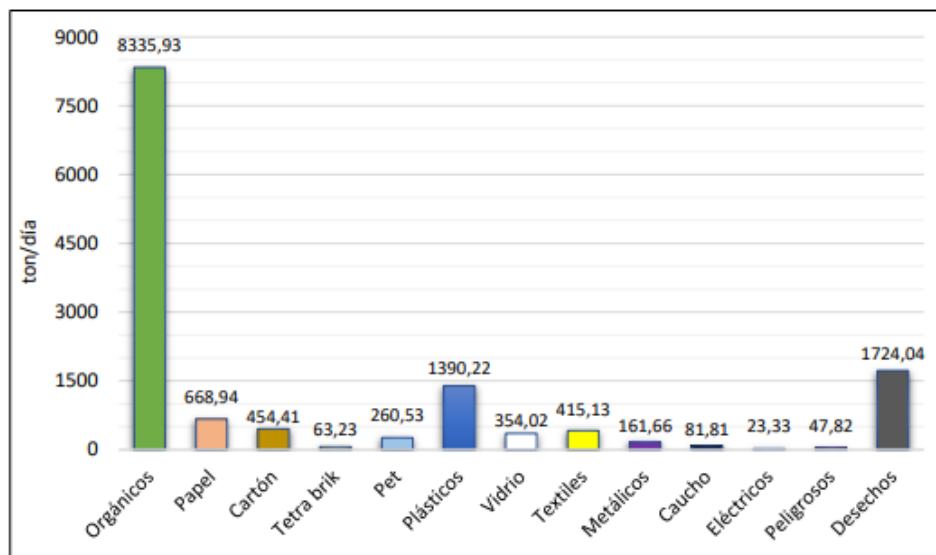
Mendoza (2014), citado por (Alcivar, 2020) menciona que la utilización y la valorización de los residuos plásticos se da mediante diferentes procesos de recuperación o tratamiento, es consecuencia de los desarrollos tecnológicos que se adelantan desde hace varios años especialmente en los países industrializados. Son múltiples las razones que han motivado estas nuevas tecnologías para el tratamiento de los residuos plásticos (Mendoza, 2014), entre ellas se destacan:

- Los grandes volúmenes de residuos plásticos domiciliarios generados.
- La legislación ambiental en general la política y la normativa de las autoridades de los países desarrollados para controlar los volúmenes de residuos sólidos (de empaques y envases plásticos), así como para el manejo y tratamiento de los desperdicios.
- El avance en el conocimiento tecnológico de los diferentes procesos y materiales plásticos Mendoza (2014), citado por (Alcivar, 2020).

2.7. CONTAMINACIÓN AMBIENTAL POR USO DE PLÁSTICO EN ECUADOR

El Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica con sus siglas (MAATE), hace mención en su Proyecto de Gestión de residuos sólidos y economía circular inclusiva (GRECI) sobre las cantidades de desechos y desperdicios sólidos que no representan peligro, generados por cada subproducto durante el año 2022 a nivel nacional. Estos datos se presentan a continuación:

Figura 9. Generación diaria de residuos sólidos por subproducto (2022)



Fuente: MAATE - Proyecto GRECI. 2022

Como es ampliamente conocido, la fracción de residuos sólidos más abundante en nuestro país es la orgánica, con una generación diaria de 8.335,93 toneladas. Le sigue el subproducto denominado desechos, con 1.724,04 toneladas por día. El tercer puesto está ocupado por la categoría de plásticos en todas sus variantes excepto el PET, con 1.390,22 toneladas por día. Esta

cantidad es particularmente relevante, ya que, en función de sus propiedades y composición, estos materiales pueden ser reciclados y aprovechados de manera más eficiente que otros.

La generación anual de PET y plásticos en el Ecuador en todas sus variantes, se muestra a continuación.

Tabla 2. Generación diaria y anual de desechos plásticos en Ecuador

	Generación de Pet	Generación de Plásticos	Total (Ton)
Generación Diaria (Ton/día)	250,53	1.390,22	1.640,75
Generación Anual (Ton/año)	91.443,45	507.430,30	598.873,75

Fuente: Autores

2.8. PIROLISIS

La pirolisis del plástico es el proceso de descomposición térmica en ausencia de oxígeno, con temperaturas comprendidas entre 400° y 1000°C, obteniendo una fracción gaseosa, líquida y sólida aprovechable. Los residuos son calentados a más de 400°C en un primer depósito donde se transforma en gas, según las temperaturas de condensación (refrigeración) de este gas, se obtiene diferentes tipos de carburantes: entre 390 y 170°C, el gas condensado produce gasóleo (diésel) entre 210 y 20°C, el gas condensado produce gasolina por debajo de los 20°C queda gas residual incondensable que pueda servir para alimentar el calor del procedimiento (Sáez, 2008).

Este es un proceso que se ha utilizado desde la antigüedad, es así que en la década de los 80, se desarrolló en Japón, pirolisis de residuos sólidos urbanos para la producción de electricidad. (Helt y col., 1984 citado por (Conesa, 1996)). En España, mediante este proceso, se comprobó que, a mayor temperatura, se da la formación de compuestos más estables térmicamente (Sáez, 2008). De igual forma, en Colombia, según (Almeida Gamarra, 2006) al pirolizar los residuos sólidos municipales se obtuvieron productos con alto poder calorífico En Ecuador, en los experimentos realizados por (Proaño & Crespo, 2009) usando polietileno de alta densidad, se obtiene diésel, kerosene y gasolina contenida en la fracción líquida.

2.8.1. TIPOS DE PIROLISIS

Butler, Devlin, & McDonnell (2011), citado por Taipe, A.G. menciona que existe:

- ***Pirolisis Catalítica:***

Contreras, C.F. hace referencia a que en este proceso se adiciona un catalizador para permitir mejorar la conversión y la calidad del combustible obtenido mediante la degradación. Taipe, A.G. hace refiere que este proceso se realiza a temperaturas que bordean los 390 y 425 °C, permitiendo una óptima producción de diésel. El aumento de la velocidad de reacción reduce el volumen del reactor, lo que permite incrementar la producción de iso-alcanos y compuestos ramificados, cíclicos y aromáticos.

- ***Pirolisis Térmica:***

Es un proceso endotérmico de altos niveles de energía que requiere temperaturas mayores a 350 °C dependiendo del polímero a degradar para aceptar rendimientos de productos aceptables. Al realizar la descomposición térmica a temperaturas ($>700^{\circ}\text{C}$), se genera una mezcla gaseosa C1-C4, fase líquida C5-C30 y compuestos aromáticos tales como (benceno y xileno). Al realizar este tipo de pirolisis con temperaturas comprendidas entre (400-500°C) se obtienen gases con alto poder calorífico, ceras y aceites.

2.8.2. VARIABLES QUE INFLUYEN EN LA PIROLISIS DE PLÁSTICOS

Scheirs & Kaminsky (2006), citado por Taipe, A.J. hace mención de que las variables que influyen en la pirolisis de plástico son las siguientes:

- ***Tipo de plástico:***

Scheirs & Kaminsky (2006), citado por Taipe, A.J. hace mención de que los polímeros se constituyen estructuralmente por átomos de carbono mediante uniones por enlaces simples o dobles. Por ello, cada tipo de polímero tiene un valor calorífico específico. El polímero al descomponerse o presentar fragmentación aleatoria de su estructura, cada uno de sus átomos de carbono, puede ser clasificado en diferentes tipos de combustibles. Por lo tanto, la pirolisis de polímeros como PE, PP y PS producen hidrocarburos valiosos.

- ***Temperatura:***

Considerada como la variable operativa de mayor importancia, debido a que, determina las velocidades de descomposición térmica y la estabilidad de la materia prima y los productos de

reacción. Los parámetros referenciales de temperatura para los procesos de pirolisis son considerados como baja ($>400^{\circ}\text{C}$), media ($400\text{-}600^{\circ}\text{C}$) y altas temperaturas ($>600^{\circ}\text{C}$), Scheirs & Kaminsky (2006).

- ***Tiempo de residencia:***

Mayor tiempo de residencia favorece la conversión secundaria de los productos primarios, lo que genera más coque, alquitrán y productos térmicamente estables ocultando las estructuras del polímero original, Scheirs & Kaminsky (2006).

- ***Tipo de reactor:***

Determina la calidad de la transferencia de calor, las mezclas y los tiempos de residencia en fase líquida, gaseosa y escape de productos primarios, Scheirs & Kaminsky (2006).

- ***Presión:***

En general la presión atmosférica es la aplicada. Los procesos a baja presión “al vacío, o en presencia de diluyentes inertes” favorecen la producción de monómeros y productos primarios e incrementan el rendimiento de alquitranes y la alta presión favorece las fracciones líquidas complejas, Scheirs & Kaminsky (2006).

- ***Velocidad de calentamiento:***

En un proceso de pirolisis lenta, las velocidades de calefacción según un orden de k/min e inclusive k/h incrementa la fracción sólida aumentando el rendimiento y disminuyendo el de gases y líquidos. Por consecuente, en un proceso de pirolisis rápida las velocidades de calefacción son

superiores a 250 k/s lo que favorece la formación de productos líquidos y gaseosos, Scheirs & Kaminsky (2006).

- ***Densidad y humedad de la carga en el reactor:***

A mayor densidad de la muestra a pirolizar se generan capturas de productos como alquitranes. Si la muestra posee un alto contenido de agua, parte del calor suministrado para la degradación de dicho material será consumido al secarse la muestra y su descomposición será generada a una temperatura inferior a la nominal favoreciendo la obtención de fracción sólida y líquida. Polietileno de alta densidad, se obtiene diésel, kerosene y gasolina contenida en la fracción líquida, Scheirs & Kaminsky (2006).

2.8.3.PRODUCTOS OBTENIDOS DE PIROLISIS

Scheirs & Kaminsky (2006), citado por Taípe, A.J. menciona que los principales productos de salida obtenidos mediante el proceso de pirolisis son las fracciones líquidas y gaseosas con estructuras similares a los productos de craqueo. Las propiedades y composiciones químicas de los productos de salida dependen de la composición de la carga de entrada. El proceso de pirolisis catalítica tiene como principal característica la obtención de altos rendimientos de combustible líquido, sus niveles de rendimiento en combustible sólido y gaseosos no condensables son inferiores respecto a la pirolisis térmica. En consecuencia, Scheirs & Kaminsky (2006), citado por Taípe, A.J. refiere que el proceso de pirolisis catalítica convierte los residuos plásticos a 270°C – 370°C. La composición de los productos obtenidos mediante la despolimerización que describe Scheirs es la siguiente:

- Combustible líquido (diésel) 93-95%.
- Gas no condicional 4-5%.
- Residuos sólidos <1%.

2.9. DESTILACIÓN

Noguera, I.B. (2020) define la destilación como un proceso que tiene como objetivo separar mezclas en fases líquidas en sus componentes individuales aprovechando su punto de ebullición. Es decir, consiste en un método de separación líquido-líquido de los elementos que componen la mezcla para separarlos mediante un cambio físico y así recuperar los elementos que tienen a evaporarse primero, mediante un intercambiador que lo retorna a su estado líquido mediante propiedades termodinámicas.

2.10. TIPOS DE DESTILACIÓN

2.10.1. DESTILACIÓN SIMPLE O POR VAPOR

Este tipo de destilación se basa en una separación por vapor, mediante el aprovechamiento de la temperatura de ebullición de los elementos más volátiles, Noguera, I.B. (2020).

2.10.2. DESTILACIÓN MOLECULAR CENTRÍFUGA

Esta destilación es bastante particular y se utiliza para separar mezclas gaseosas. Como su nombre lo indica, utiliza centrifugadoras industriales cerradas herméticamente. La mezcla gaseosa ocupa todo el espacio dentro de dichas centrifugadoras verticales y por efecto de gravedad los gases se separan., Noguera, I.B. (2020).

2.10.3. DESTILACIÓN AL VACÍO

Este proceso de destilación consiste en vaciar todo el aire que se encuentra dentro del destilador para de esa forma obtener una destilación eficiente, cuando se deben separar componentes de baja estabilidad, Noguera, I.B. (2020).

2.10.4. DESTILACIÓN DESTRUCTIVA

Este proceso de destilación consiste en descomponer las mezclas mediante temperaturas elevadas de tal forma que sea posible recuperar las sustancias derivadas de las descomposiciones de la mezcla original, las mismas que son separadas mediante fraccionamientos durante la destilación, Noguera, I.B. (2020).

2.10.5. DESTILACIÓN FRACCIONADA

Este proceso de destilación permite realizar varias etapas de destilación en un mismo destilador, utilizando superficies o platos en torres de tamaño variable para realizar varios procesos de destilación simultáneamente, de modo que cada etapa ofrezca destilados más puros del componente más volátil a medida que se acerca a la punta de la torre de destilación. Cada etapa o plato del destilador realiza una destilación y condensa vapor del componente volátil y lo recolecta, mientras sigue subiendo vapor a etapas superiores, Noguera, I.B. (2020).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLOGICO

3. METODOLOGÍA APLICADA

El presente trabajo se desarrolló con base a la metodología de investigación experimental y de campo, los resultados obtenidos se presentarán en el capítulo de análisis de resultados.

3.1. HIPÓTESIS Y ESPECIFICACIÓN DE VARIABLES

3.1.1. HIPÓTESIS GENERAL

El proceso de pirolisis térmica de los residuos plásticos genera como resultado combustible de tipo sólido, líquido y gaseoso, ésta es una metodología de aprovechamiento de poder calórico y valor energético de los residuos plásticos. Sin embargo, se debe considerar que cada tipo de plástico posee un valor calorífico específico, y que estos polímeros al descomponerse o presentar fragmentación aleatoria de su estructura, pueden ser clasificados en diferentes tipos de combustibles; al mezclar y someter a este tipo de proceso diferentes tipos de residuos plásticos dentro de una misma muestra se obtendrá un producto con variación en su composición y eficiencia.

3.1.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

- **H1:** Obtener una fracción líquida como resultado del proceso de transformación de los residuos plásticos mediante pirolisis y destilación.

- **H2:** Disminuir el nivel de contaminación ambiental generada por los residuos plásticos.
- **H3:** Analizar las propiedades físicas de la fracción líquida obtenida mediante la pirolisis, y a su vez evaluar las propiedades físicas de la fracción líquida una vez destilado.

3.1.3. IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES

Las principales variables que se determinaron dentro del proceso de transformación de residuos plásticos mediante el proceso de pirolisis térmica y destilación fueron temperatura, tiempo de residencia y los diferentes tipos de residuos plásticos.

Tabla 3. Identificación de las variables que intervienen en el proceso de pirolisis y destilación

ETAPAS DEL PROCESO	VARIABLES INDEPENDIENTES	VARIABLES DEPENDIENTES
Preparación inicial de la muestra	Tipo de residuos plásticos Gramaje de muestra	Peso
Pirolisis	Velocidad de calentamiento	Temperatura de los gases Rango de Temperatura en la que se lleva a cabo el proceso de pirolisis Rendimiento de líquido
Finalización del proceso de pirolisis	Tiempo de residencia	Rendimiento sólido Rendimiento gaseoso
Análisis de la fracción líquida	Reactor de pirolisis	Volumen de fracción líquida obtenida

Fuente: Autores

Tabla 4. Aspectos generales de la metodología aplicada

PROBLEMÁTICA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL
<p>Por medio de esta experimentación se producirá combustible líquido apto para uso automotor, considerando que la producción de este combustible representa una alternativa sostenible ante la dependencia a los combustibles fósiles. Además, mediante la aplicación del proceso de pirolisis se reducirá el volumen de contaminación generada por los desechos plásticos.</p>	<p>Obtener combustible líquido, mediante el proceso de pirolisis térmica a partir de residuos plásticos.</p>	<p>La pirolisis térmica de residuos plásticos da como resultado combustible de tipo sólido, líquido y gaseoso, ésta es una metodología de aprovechamiento de poder calórico y valor energético de los residuos plásticos.</p>

Fuente: Autores

Tabla 5. Aspectos específicos de la metodología aplicada

PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECIFICOS	HIPOTESIS ESPECIFICAS	VARIABLES DE LAS HIPOTESIS ESPECIFICAS	TÉCNICAS DE RECOLECCION DE DATOS
Desconocimiento de los resultados obtenidos de la pirolisis y destilación de residuos plásticos	Obtener una fracción líquida como resultado del proceso de transformación de los residuos plásticos mediante pirolisis y destilación para disminuir el nivel de contaminación ambiental generada por los residuos plásticos.	H1: Obtener una fracción líquida como resultado del proceso de transformación de los residuos plásticos mediante pirolisis y destilación.	Tipo de residuos plásticos / Tamaño de partícula de los plásticos	Masa de la muestra
La eficiencia de la fracción líquida obtenida se determinará según los rangos de temperatura en que se lleve a cabo el proceso de pirolisis y las proporciones de residuos plásticos depositados en el reactor.	Determinar el grado de temperatura óptimo para obtener mayor eficiencia en función a mayor volumen de líquido obtenido.	H2: Disminuir el nivel de contaminación ambiental generada por los residuos plásticos.	Gramos de plástico / kilogramos	(-)
Evaluar la calidad del combustible obtenido es relevante debido al desconocimiento de los resultados.	Analizar las propiedades físicas de la fracción líquida obtenida.	H3: Analizar las propiedades físicas de la fracción líquida obtenida mediante la mezcla de residuos plásticos.	Volumen de muestra / método de destilación	Análisis de color y olor , densidad y grados API

Fuente: Autores

3.2. MATERIA PRIMA Y EQUIPOS

3.2.1. PROCEDIMIENTO Y ADECUACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Se recolectaron diferentes tipos de residuos plásticos (botellas de bebidas, botellas de agua, envases de margarina, fundas plásticas, bolsas de supermercado, etc.) provenientes de hogares de familiares y amigos; para la adecuación de estos materiales se procedió a lavar los envases para evitar algún tipo de contaminación y posteriormente se los seco al sol por un tiempo de 2 días, para posteriormente triturarlos y medir el gramaje de la mezcla de residuos plásticos.

Figura 10. Adecuación de la materia prima



Fuente: Autores

3.2.2. EQUIPO DE PIRÓLISIS

Para llevar a cabo el procedimiento de pirólisis se construyó un reactor de pirólisis. Este equipo permite transformar los residuos plásticos mediante descomposición térmica en ausencia de oxígeno, permitiendo obtener una fracción de aceites de pirólisis para ser posteriormente refinados por destilación. El equipo se muestra en la figura 11 y consiste en varias partes que se detallan a continuación.

Figura 11. Equipo de pirólisis



Fuente: Autores

Controlador de temperatura:

El controlador de temperatura permite regular el estado térmico dentro de la recámara manteniendo una temperatura estable; permite programar la temperatura objetivo (SV) y también conocer la temperatura del proceso (PV). El controlador se puede observar en la figura 12.

Los componentes electrónicos que conforman el controlador de temperatura son:

- ***Termostato Rex:***

Este equipo se emplea con el propósito de asegurar una temperatura de proceso constante sin importar las influencias externas. Aplican mecanismos de retroalimentación en circuito cerrado para supervisar la temperatura actual de forma continua y realizar modificaciones cuando resulte pertinente. El equipo cuenta con una pantalla de dos líneas compuestas por segmentos numéricos. En la parte superior se visualiza la temperatura actual, denominada también Variable de Proceso (PV). En la línea inferior se muestra la temperatura deseada, conocida como Variable Establecida (SV).

- ***Sensor termocupla tipo K:***

Una termocupla tipo K es un sensor de temperatura que convierte la diferencia de temperatura entre dos puntos en una señal eléctrica. Consiste en dos metales diferentes unidos en un extremo, generando una corriente eléctrica proporcional a la diferencia de temperatura.

- *Relay estado sólido SSR-40 DA:*

Este equipo permite controlar el encendido y apagado de los equipos de corriente alterna que se encuentran dentro del controlador de temperatura. Esta recibe la señal de la termocupla y permite encender y apagar la resistencia.

Figura 12. Controlador de temperatura



Fuentes: Autores

Recámara térmica:

La recámara térmica permite concentrar la temperatura para alcanzar valores térmicos más altos, también permite aislar la temperatura exterior evitando las fluctuaciones térmicas. Esta recámara permitirá el calentamiento del reactor pudiendo alcanzar temperaturas de 500°C las cuales son suficientes para la desintegración térmica de los residuos plásticos utilizados. La recámara está compuesta por una resistencia vitrocerámica de 1800 W que está aislada por ladrillos refractarios

que soportan una temperatura de 1350°C . Todo este conjunto está reforzado con una lámina de acero de 2mm de espesor. La recámara térmica se puede observar en la figura 13 y 14.

Figura 13. Recámara térmica-resistencia vitrocerámica



Fuente: Autores

Figura 14. Recámara térmica



Fuente: Autores

Reactor:

El reactor permite concentrar los residuos plásticos, y forma una barrera protectora para evitar la entrada de oxígeno en su interior y salida de gases por medio de un empaque. En el interior del reactor se alcanzarán temperaturas superiores a los 400°C lo que producirá la descomposición térmica de los plásticos reduciendo largas cadenas de polímeros en una composición más reducida, convirtiendo los productos plásticos en gases, líquidos y sólidos carbonosos. El reactor se puede observar en la figura 15.

Figura 15. Reactor de pirolisis



Fuente: Autores

Condensador:

El condensador permite enfriar los gases resultantes de la pirolisis condensándolos en líquidos carbonosos y oleosos, se empleó un condensador recto con refrigeración líquida (H_2O) a contraflujo. Se utiliza una bomba de agua para inyectar el refrigerante, la cual está conectada a una entrada y una salida a través de mangueras. El condensador se puede observar en la figura 16.

Figura 16. Condensador



Fuente: Autores

Contenedor:

El contenedor permite almacenar la fracción líquida obtenida de la condensación de los gases de pirolisis y a su vez permite expulsar del sistema los gases no condensables que son incinerados por combustión a través de una boquilla. El contenedor se puede observar en la figura 17.

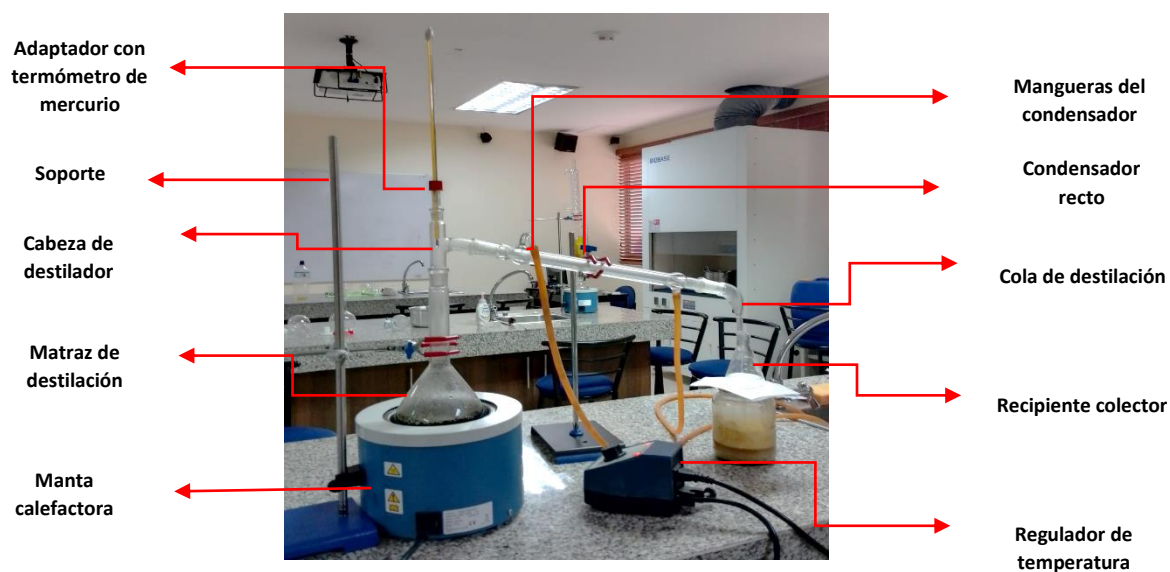
Figura 17. Contenedor

Fuente: Autores

3.2.3. EQUIPO DE DESTILACIÓN

Para destilar el aceite obtenido de la pirolisis se utilizó un equipo de destilación simple el cual permite separar los componentes líquidos de una mezcla líquida mediante el proceso de destilación. Esta técnica de separación se basa en las diferencias de los puntos de ebullición de los componentes de una mezcla para obtener determinadas fracciones de diferentes densidades. El equipo se muestra en la figura 18 y consta de las siguientes partes:

Figura 18. Equipo de destilación



Fuente: Autores

- ***Manta calefactora:***

Es una fuente de calor que se encarga de elevar la temperatura del matraz para calentar los componentes líquidos.

- ***Matraz de destilación:***

Permite calentar los componentes de la mezcla hasta convertirlos en vapor.

- ***Cabeza del destilador:***

Conecta el matraz del con el condensador y permite que los vapores generados en el matraz se dirijan hacia el condensador.

- ***Condensador:***

Enfría los vapores provenientes del matraz para que se condensen y se conviertan en líquido nuevamente. El condensador puede ser de diferentes tipos, como el de serpentina o el de reflujo.

- ***Termómetro de mercurio:***

Permite monitorear la temperatura de los gases durante el proceso.

- ***Cola del destilador:***

Permite que el líquido destilado fluya desde el receptor hacia un recipiente de recolección.

- ***Recipiente colector:***

Es el recipiente donde se recoge el líquido condensado, que ahora se ha separado en sus componentes individuales.

3.2.4. EQUIPO DE ANÁLISIS

Para realizar los análisis de las muestras obtenidas se utilizó un equipo de medición DENSITO de la marca METTLER TOLEDO. Con este equipo se hicieron los análisis de densidad y grados API.

Figura 19. Equipo de medición de grados Api-Densito Mettler



Fuente: Autores

3.3. DISEÑO EXPERIMENTAL

En la pirólisis la velocidad de calentamiento se regirá mediante una resistencia vitrocerámica de 1800W. En controlador de temperatura se encarga de mantener la temperatura estable para evitar alteraciones en el proceso. En el proceso de destilación se incorporará un termómetro como indicador de temperatura y se regularán las mismas con un controlador mediante resistencias. Estos datos se analizarán mediante diagramas de temperatura-tiempo.

Tabla 6. Tiempos y temperaturas del proceso de destilación de la muestra 1

MUESTRA 1					
FASE 1-FRACCIÓN SEPARACIÓN 40-75 °C		FASE 2-FRACCIÓN SEPARACIÓN 75-95 °C		FASE 3-FRACCIÓN SEPARACIÓN 95-110 °C	
TIEMPO (min)	TEMPERATURA	TIEMPO (min)	TEMPERATURA	TIEMPO (min)	TEMPERATURA
10	65	10	76	10	87
20	67	20	78	20	90
30	72	30	79	30	94
40	74	40	79	40	100
50	75	50	80	50	104
60	76	60	84	60	107

Tabla 7. Tiempos y temperaturas del proceso de destilación de la muestra 2

MUESTRA 2					
FASE 1-FRACCIÓN SEPARACIÓN 40-75 °C		FASE 2-FRACCIÓN SEPARACIÓN 75-95 °C		FASE 3-FRACCIÓN SEPARACIÓN 95-110 °C	
TIEMPO (min)	TEMPERATURA	TIEMPO (min)	TEMPERATURA	TIEMPO (min)	TEMPERATURA
10	40	10	85	10	85
20	67	20	85	20	88
30	70	30	90	30	90
40	72	40	92	40	95
50	75	50	91	50	102
60	77	60	95	60	106

Fuente: Autores

3.4. DESARROLLO EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE PIRÓLISIS

Se trituraron 800 gramos de residuos plásticos de distintos tipos, entre ellos PET, PP, PVC, Polietileno entre otros, y se pesaron en una báscula digital marca TRUPER modelo BASE-5EP con una capacidad de 5 kilogramos y una graduación de 1 gramo, posteriormente se introdujeron los 800 gramos de plástico en el reactor con capacidad de 10 litros aproximadamente, se colocó la empaquetadura de asbesto y se cerró la tapa, se apretaron los pernos los 12 pernos con una llave boca-corona de 17 mm y se introdujo en la recámara térmica, se acopló la columna de evaporación y se montó el medidor de temperatura de gases en el extremo superior de la columna , luego se acopló el condensador recto, se colocaron las mangueras de entrada y salida de refrigerante y se conectó con la bomba de recirculación de agua. En la salida del condensador se colocó el contenedor receptor del aceite de pirolisis y en él se acopló la boquilla de quema de gases. En la recámara térmica se conectó al controlador de temperatura y se introdujo la termocupla tipo K para la lectura de la temperatura del proceso.

Se conectó el controlador de temperatura a una fuente de alimentación de 220V y se encendió, seguidamente se programó la temperatura final a 500°C, y se procedió a conmutar el switch para encender la recamar térmica, posteriormente, se encendió la bomba de recirculación de agua para la refrigeración del condensador. Cuando el reactor alcanza una temperatura de 155°C en un tiempo de 10 minutos empiezan a salir los primeros gases de pirolisis por la boquilla de quema de gases. Cuando el reactor alcanza una temperatura de 280°C en un tiempo de 36 minutos y una temperatura de gases mayor a 120°C, se depositan las primeras fracciones de aceite de pirolisis en el contenedor receptor. Finalmente, cuando el reactor alcanza una temperatura de 456°C en un tiempo de 2 horas y 10 minutos la temperatura de los gases disminuyó a 40°C y la producción

de gases no condensables fue casi nula, se procedió a apagar el equipo y finalizar el proceso de pirolisis. El tiempo de todo el proceso de pirolisis fue de 2 horas y 10 minutos. A lo largo de todo el proceso se hicieron mediciones de tiempo y temperatura para asegurar el control del proceso, además se realizaron extracciones periódicas de aceite de pirolisis para evitar la polimerización dentro del contenedor receptor.

Figura 20. Reactor de pirolisis en funcionamiento



Fuente: Autores

Figura 21. Residuos carbonizados después del proceso de pirolisis



Fuentes: Autores

3.4.1. RENDIMIENTO DE LAS MUESTRAS DE PIROLISIS

Para pesar las muestras sólidas y líquidas obtenidas en el proceso de pirolisis se utilizó una balanza de precisión 4200 x 0,01 g marca SARTORIUS, ubicada en el laboratorio de química del campus Centenario.

Para calcular el rendimiento en porcentaje se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

- Medir la masa de los residuos plásticos y apuntar su valor.
- Medir y tarar la masa del recipiente que va a contener la muestra de aceite de pirolisis.
- Verter la muestra de aceites de pirolisis en el recipiente.
- Medir la masa de la muestra del aceite de pirolisis y apuntar el valor.

Se procede a aplicar la siguiente ecuación para obtener el rendimiento en porcentaje.

$$\text{Ec. 1} \quad \% \text{ de Rendimiento} = \frac{\text{Masa neta de la muestra}(g)}{\text{Masa de residuos plasticos}(g)} * 100\%$$

**3.4.2.DIAGRAMA DE PROCESO
FABRICACIÓN DEL EQUIPO DE PIRÓLISIS
DIAGRAMA N°1**

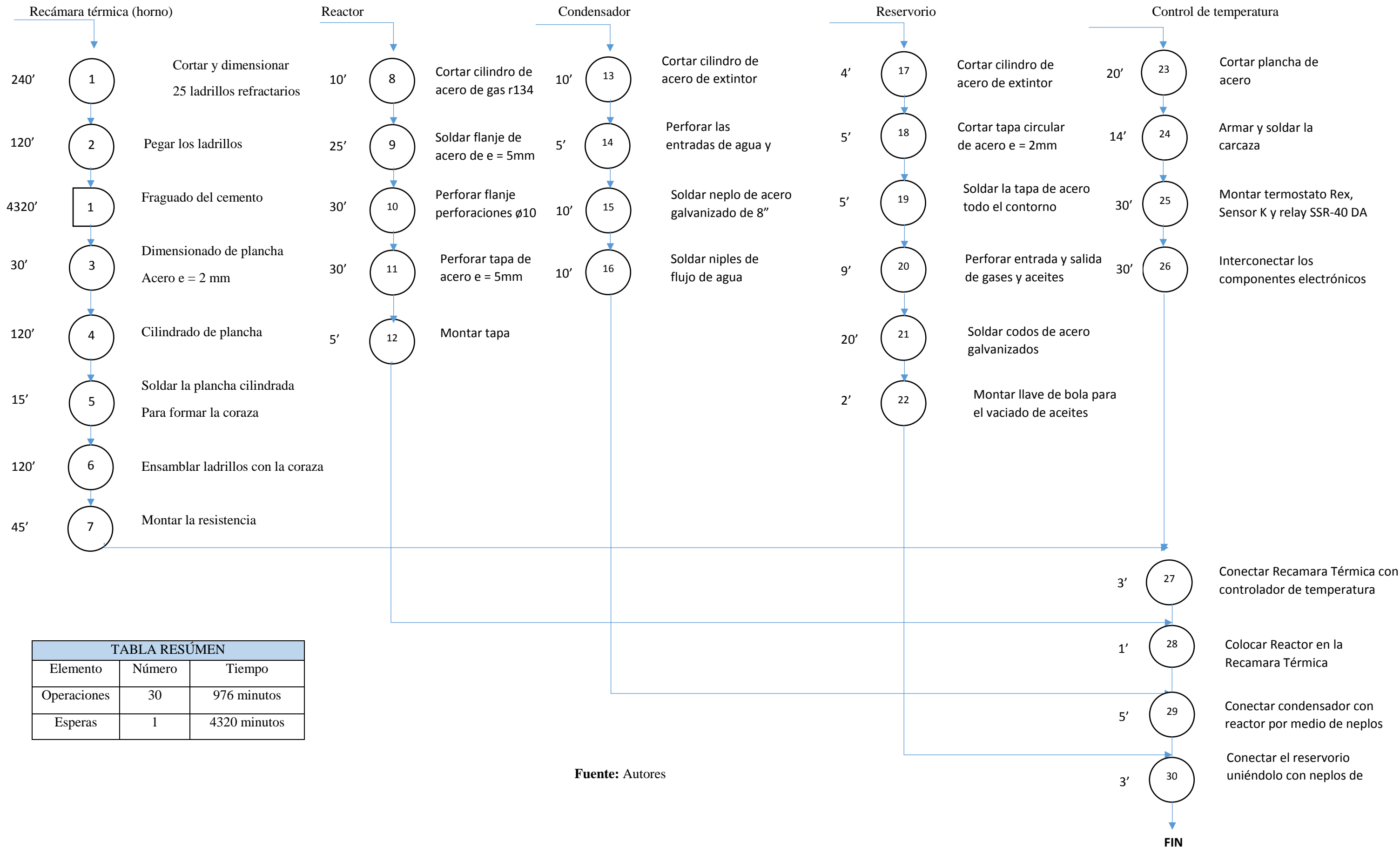


TABLA RESÚMEN		
Elemento	Número	Tiempo
Operaciones	30	976 minutos
Esperas	1	4320 minutos

Fuente: Autores

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO													
Fecha Realización: 13 de agosto del 2023				Ficha Número: 1									
Diagrama No. 1		Página 1 de 1		RESUMEN									
Proceso: Pirolisis de residuos plásticos				Actividad		Actual		Propuesto		Economía			
						Cant.		Tiemp.		Cant.		Tiemp.	
Actividad: Obtención de aceite de pirolisis				Operación		20		0.67h					
				Transporte		2		10 seg					
Tipo de diagrama:				Material ()		Espera		3		2.66 h			
				Operario (x)		Inspección		2		6 min			
Método:				Actual (x)		Almacenamiento		0		0			
				Propuesto ()		Distancia Total		4 metros					
Área / Sección:				Tiempo Total		3.44							
Elaborado por: Ricardo Torres – Mercy Angulo				Aprobado por:									
Descripción									Dist.	t.(s)	Observaciones		
Abrir la puerta y entrar al taller.				x				2	5				
Mover el equipo de pirolisis a la zona de trabajo.				x				2	5				
Abrir la tapa del reactor				x					240				
Medir la masa de los residuos plásticos							x		360				
Introducir los residuos plásticos al reactor				x					300				
Tapar y apretar los pernos de la tapa				x					360				
Armar la torre de evaporación de gases				x					50				
Conectar termómetro de reloj				x					5				
Conectar el condensador				x					50				
Conectar el reservorio de aceite de pirolisis				x					40				
Conectar las mangueras de refrigeración del condensador				x					120				
Conectar la bomba de agua				x					30				
Introducir la termocupla tipo k				x					10				
Conectar el controlador de temperatura a la resistencia				x					240				
Conectar el controlador de temperatura a la fuente de energía				x					20				
Encender el control de temperatura				x					5				
Ajustar los parámetros de la temperatura final				x					60	Se ajusta a una t. 500C° final			
Esperar la salida de los primeros gases de pirolisis							x		600				
Combustionar los gases de salida no condensables				x					5				
Esperar a que se complete el proceso de pirolisis							x		5400				
Controlar temperaturas							x		10	A los 270°C se produce el aceite			
Retirar periódicamente el aceite de pirolisis del reservorio				x					20	Puede polimerizarse si no se hace			
Apagar el control de temperatura cuando los gases no condensables disminuyan o sean nulos				x					5				
Esperar el enfriamiento del equipo							x		3600				
Destapar el reactor				x					300				
Retirar y limpiar el carbón residual del reactor				x					200				
Limpiar y guardar				x					360				
TOTAL								4 metros	3.44 horas				

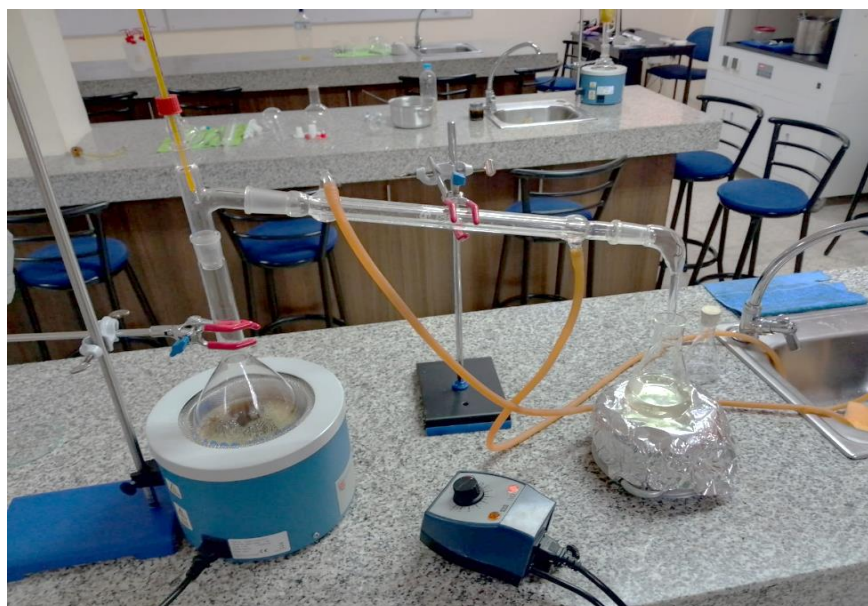
3.5. DESARROLLO EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE DESTILACIÓN

Se midió la masa de la muestra de pirolisis en una balanza de precisión 4200 x 0,01 g marca SARTORIUS y se anotó el peso, se vertió la muestra de aceites de pirolisis en un vaso precipitado de 500 ml, se colocó el vaso precipitado con la muestra sobre un agitador magnético de placa caliente marca MTOPS modelo MS300H y se calentó hasta el punto de fusión, se midió el volumen alcanzando los 250 ml y se anotó; se añadió 250ml de alcohol potable al 96% y se depositó la muestra al matraz por medio de un embudo.

Se colocó la manta térmica sobre el mesón de granito, se conectó el controlador de temperatura a la manta y se enchufó a la corriente. Sobre la manta térmica se colocó el matraz con la muestra, inmediatamente se acopló la cabeza del destilador en el matraz, se conectó el termómetro, luego se conectó el condensador recto y se fijó a un soporte de atril, se instaló la cola de destilación y se colocó el recipiente colector que contendrá las fracciones de combustible destilado, se colocaron las mangueras a contraflujo y se procedió a encender la manta térmica en la posición 2, cuando se alcanzó los 65°C de vapor de gases en un tiempo de 10 minutos se pudo observar las primeras gotas de la primera fracción que continua su destilación hasta los 75°C , una vez alcanzados los 75°C en un tiempo de 60 minutos, se procedió a cambiar el recipiente colector para almacenar la segunda fracción que continua destilando hasta los 95°C, superando los 95°C en un tiempo de 60 minutos, se procedió a cambiar el recipiente colector para empezar a almacenar la tercera fracción que continua destilando hasta los 110°C en un tiempo de 60 minutos. Cada 10 minutos se apuntaron los valores de temperatura que indicaba el termómetro. Para finalizar el proceso de destilación se apagó la manta térmica, se desarmó el equipo y se limpió.

Para la destilación de la muestra 2 se utilizó el mismo procedimiento que la muestra 1 con la excepción que no se utilizó disolvente.

Figura 22. Equipo de destilación en funcionamiento



Fuente: Autores

3.5.1. RENDIMIENTO DE LAS MUESTRAS DE DESTILACIÓN

La destilación se llevó a cabo de dos formas, a la muestra 1 se le incorporó 250 ml de alcohol potable al 96%, y la segunda muestra se destiló sin disolvente. Para medir el rendimiento de las fracciones obtenidas se utilizó un vaso precipitado de 500 ml y tres matraces Erlenmeyer de 100 ml, para medir la muestra 1 (Ec.2) y para medir la muestra 2 (Ec.3).

Se procede a utilizar las siguientes ecuaciones para obtener el rendimiento en porcentaje

$$\text{Ec. 2 } \% \text{ de Rendimiento } m1 = \frac{\text{ml de la fracción obtenida}}{\text{ml de de la muestra} + 250\text{ml de disolvente}} * 100\%$$

$$\text{Ec. 3 } \% \text{ de Rendimiento } m2 = \frac{\text{ml de la fracción obtenida}}{\text{ml de de la muestra 2}} * 100\%$$

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DEL FRACCIONAMIENTO												
Fecha Realización: 13 de agosto del 2023					Ficha Número: 001							
Diagrama No. 1		Página 1 de 1			RESUMEN							
Proceso: Fraccionamiento del aceite de pirolisis					Actividad		Actual		Propuesto		Economía	
							Cant.	Tiemp.	Cant.	Tiemp.	Cant.	Tiemp.
Actividad: Destilación de aceite de pirolisis					Operación		15	1.22				
					Transporte		8	0.041				
Tipo de diagrama:		Material ()			Espera		3	3				
		Operario (x)			Inspección		4	0.019				
Método:		Actual (x)			Almacenamiento		0	0				
		Propuesto ()			Distancia Total		16 metros					
Área / Sección:					Tiempo Total		4.28 horas					
Elaborado por: Ricardo Torres Acuña– Mercy Angulo Cotera					Aprobado por:							
Descripción									Dist.	t.(s)	Observaciones	
Abrir la puerta y entrar el laboratorio de química.						x				60		
Desplazarse hasta el mesón de granito.						x			4	25		
Caminar al área de depósito de utensilios químicos						x			2	12		
Tomar el equipo de destilación					x					10		
Desplazarse hasta el mesón de granito						x			2	12		
Armar el equipo de destilación					x					1200		
Conectar mangueras de enfriamiento del condensador					x					25		
Desplazarse hacia las muestras de aceite de pirolisis						x			2	10		
Tomar la muestra					x					5		
Desplazarse hacia la balanza electrónica						x			2	10		
Medir masa en gramos de la muestra								x		25		
Tomar la muestra y desplazarse hacia la placa calefactora						x			2	10		
Depositar la muestra en la placa calefactora y calentar					x					900		
Tomar la muestra y desplazarse hacia el destilador						x			2	10		
Verter la mezcla de aceite de pirolisis en el matraz					x					5		
Abrir el paso de agua al condensador					x					5		
Encender la manta calefactora y regular temperatura					x					5	Regular a los 65°C	
Verificar la temperatura								x		15		
Esperar la primera fracción a una temperatura constante							x			3600	Se obtiene de las 40-75°C	
Cambiar de matraz receptor una vez obtenida la 1° fracción					x					45		
Regular la temperatura					x					10	Regular a los 85°C	
Verificar la temperatura								x		15		
Esperar la segunda fracción a una temperatura constante							x			3600	Se obtiene desde los 75-95°C	
Cambiar de matraz receptor una vez obtenida la 2° fracción					x					45		
Regular la temperatura					x					10	Regular a los 100°C	
Verificar la temperatura								x		15		
Esperar la tercera fracción a una temperatura constante							x			3600	Se obtiene desde los 95-110°C	
Apagar Manta eléctrica					x					5		
Retirar el matraz receptor con la 3° fracción					x					45		
Desarmar, limpiar y guardar el equipo de destilación					x					2100	Limpiar con solvente	
TOTAL					15	8	3	4	16 metros	15434 seg		

3.6. ANÁLISIS FÍSICO DE LA FRACCIÓN LÍQUIDA OBTENIDA A PARTIR DE LA PIRÓLISIS Y DESTILACIÓN DE LA MUESTRA

A la muestra obtenida del proceso de pirolisis y al fraccionamiento líquido resultante del proceso de destilación se le realizó una prueba organoléptica. Las densidades se determinaron con un Densitor de la marca Mettler Toledo a partir de las fracciones líquidas obtenidas de la destilación.

3.6.1. ANÁLISIS ORGANOLÉPTICO

El análisis organoléptico de las muestras de pirolisis y las fracciones líquidas obtenidas de la destilación se analizaron mediante pruebas físicas de olor y color con base a la percepción del observador.

3.6.2. ANÁLISIS DE DENSIDAD

La densidad fue calculada a partir de las fracciones líquidas obtenidas por el proceso de destilación, para realizar el análisis se utilizó el equipo DENSITO de la marca METTLER TOLEDO

Para la obtención de los grados API se efectuó el siguiente procedimiento:

- Encender el equipo
- Limpiar el equipo con 10ml de formol
- Programar el método de análisis de densidad
- Verter 10 ml de las fracciones líquidas en tubos ensayo graduados
- Introducir la sonda del equipo dentro del tubo de ensayo para realizar el análisis.

3.6.3. ANÁLISIS DE GRAVEDAD API

La gravedad API fue calculada a partir de las fracciones líquidas obtenidas por el proceso de destilación, para realizar el análisis se utilizó el equipo DENSITO de la marca METTLER TOLEDO

Para la obtención de los grados API se efectuó el siguiente procedimiento:

- Encender el equipo
- Limpiar el equipo con 10ml de formol
- Programar el método de análisis a gravedad API
- Verter 10 ml de las fracciones líquidas en tubos ensayo graduados
- Introducir la sonda del equipo dentro del tubo de ensayo para realizar el análisis.

3.6.4. CALCULO DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA

Para el cálculo de la gravedad específica, se tomó en cuenta como densidad del agua que corresponde a 0,997 g/cm³ y se plasmó en la siguiente ecuación:

$$\text{Ec. 4} \quad GS = \frac{\text{Densidad de la fraccion}(g/cm^3)}{\text{Densidad de agua}(g/cm^3)}$$

3.7. CALCULO DE REDUCCIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS CON EL PROCESO DE PIROLISIS

En la experimentación de la pirolisis térmica el plástico se transformó en tres subproductos: carbón, aceite y gases. En la primera experimentación de pirolisis se utilizaron 400g de plástico y se obtuvo como subproductos 50,3g de carbón, 195,72g de aceite de pirolisis y el restante se transformó en gases no condensables. Para el segundo experimento de pirolisis se utilizaron 800g de plástico y se obtuvo como subproductos 81,2 g de carbón, 337g de aceite de pirolisis y el restante se transformó en gases no condensables. Para calcular la reducción de los residuos plásticos con base en los datos obtenidos en la experimentación del proceso de pirolisis se utiliza la siguiente ecuación.

Ec. 5 *Cantidad restante de desechos plásticos =*

*Total desechos plásticos usados – (Total desechos plásticos utilizados * \sum Total de los porcentajes de subproductos obtenidos por pirolisis)*

Para calcular el carbón resultante de la transformación del plástico se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

- Medir la masa de los residuos plásticos y apuntar su valor.
- Medir y tarar la masa del recipiente que va a contener la muestra de carbón de pirolisis.
- Verter la muestra de carbón de pirolisis en el recipiente.
- Medir la masa de la muestra del carbón de pirolisis y apuntar el valor.

Se procede a aplicar la siguiente ecuación para obtener el rendimiento en porcentaje.

$$\mathbf{Ec. 6} \quad \% \text{ de Carbón} = \frac{\text{Masa neta de carbón de pirolisis}(g)}{\text{Masa de residuos plasticos}(g)}$$

Para calcular el aceite de pirolisis resultante de la transformación del plástico se debe calcular la siguiente ecuación.

$$\mathbf{Ec. 7} \quad \% \text{ de Aceite de pirólisis} = \frac{\text{Masa neta de la muestra}(g)}{\text{Masa de residuos plasticos}(g)} * 100\%$$

Para calcular los gases de pirolisis resultante de la transformación del plástico, se debe realizar la siguiente ecuación:

$$\mathbf{Ec. 8} \quad \% \text{ de Gases} = 100 - (\% \text{ de aceite pirólico} + \% \text{ de carbón de pirólisis})$$

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. RESULTADO DE LA PIRÓLISIS TÉRMICA

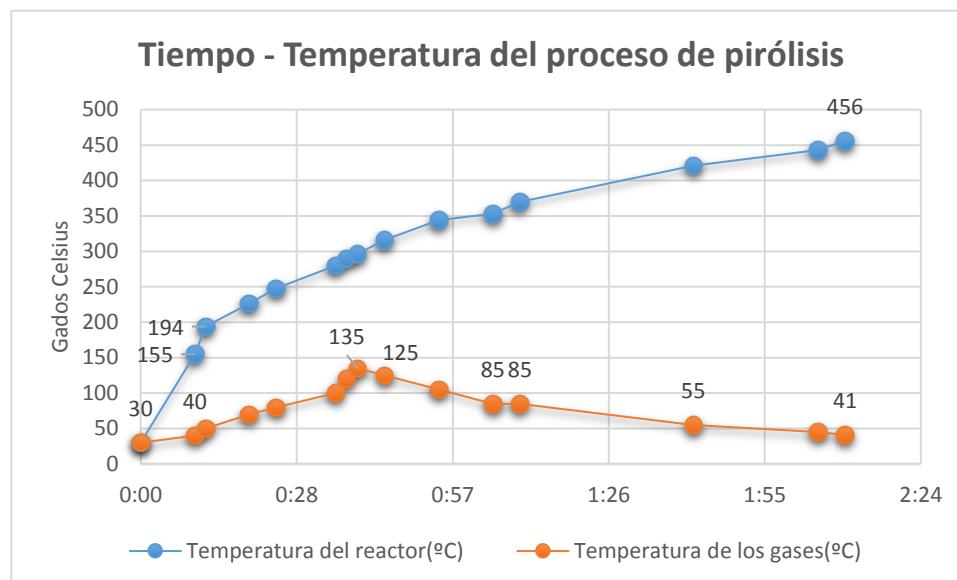
El proceso de pirólisis se llevó a cabo en aproximadamente 2 horas: 10 minutos, dentro de este rango de tiempo, se anotó la temperatura del reactor y de los gases, los datos obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 8. Tiempo - Temperatura del proceso de pirólisis

Tiempos del proceso(h)	Temperatura del reactor(°C)	Temperatura de los gases(°C)
0:00	30	30
0:10	155	40
0:12	194	50
0:20	226	70
0:25	248	80
0:36	280	100
0:38	290	120
0:40	296	135
0:45	316	125
0:55	344	105
1:05	353	85
1:10	370	85
1:42	421	55
2:05	443	45
2:10	456	41

Fuente: Autores

Figura 23. Temperatura-tiempo del proceso de pirólisis



Fuentes: Autores

En la figura 23, se observa que el proceso de pirólisis dio inicio con una temperatura de 30°C, a los diez minutos haber empezado el proceso la temperatura del reactor incremento a 155°C mientras que la temperatura de los gases se mantuvo en 40°C. A partir del minuto 36, se empezó a obtener las primeras condensaciones de aceite pirólico, este proceso continuó hasta cumplir 1 hora y 10 minutos, alcanzando el pico máximo de temperatura de gases a los 40 minutos; durante todo este rango de tiempo se alcanzó la mayor producción de aceite de pirólisis. Después de este periodo de tiempo la temperatura de los gases empieza a decaer y la producción de aceite también. Se pudo determinar que, desde los 280°C hasta los 370°C de temperatura en el reactor, se produjo la mayor cantidad de aceite pirólico.

El resultado de pirolisis térmica a partir de los residuos plásticos se calculó en base al porcentaje de rendimiento de las muestras obtenidas y la cantidad de materia prima utilizada en peso. Al reemplazar los datos obtenidos a lo largo del proceso en la **Ec.1** se obtienen los siguientes resultados.

- **% de Rendimiento de la Muestra 1**

Para la muestra 1, se utilizó 450 gramos de residuos plásticos y se obtuvo 195.74 gramos de masa neta de aceite de pirolisis, tal como se observa en la figura 24.

Figura 24. Masa neta de aceite de pirolisis de la muestra 1



Fuente: Autores

Al reemplazar los datos en la ecuación se obtiene el siguiente resultado.

$$\text{Ec. 1 } \% \text{ de Rendimiento} = \frac{195.73(g)}{450(g)} * 100\% = 43.49\%$$

Como resultado de la primera pirolisis se puede concluir que de 450g de residuos plástico se puede obtener un 43.49% de aceite pirólico.

- *% de Rendimiento de la Muestra 2*

Para la muestra 2, se utilizó 800 gramos de residuos plásticos y se obtuvo 337.87 gramos de masa neta de aceite de pirolisis, tal como se observa en la figura 25.

Figura 25. Masa neta de la muestra2



Fuente: Autores

Al reemplazar los datos en la ecuación se obtiene el siguiente resultado.

$$Ec. 1 \quad \% \text{ de Rendimiento} = \frac{337.87(g)}{800(g)} * 100\% = 42.23\%$$

Como resultado de la segunda pirolisis se puede concluir que de 800g de residuos plástico se puede obtener un 42.23% de aceite pirólico.

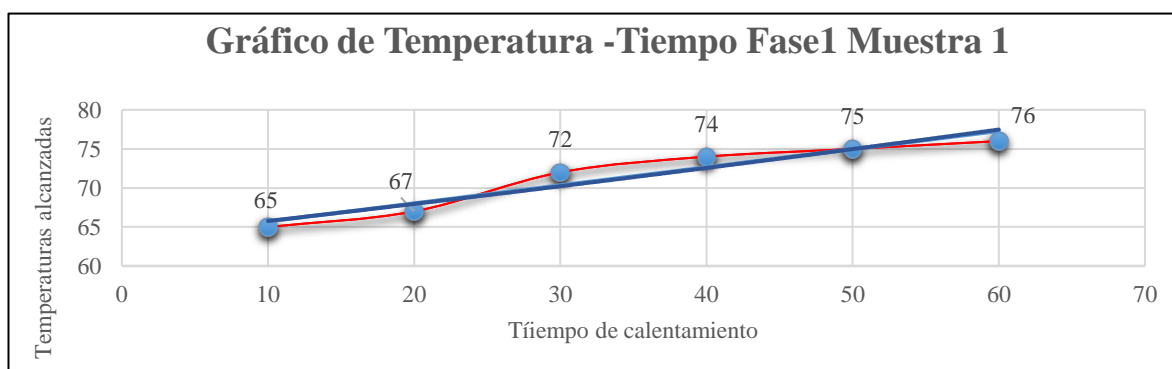
4.2. RESULTADO DE LA DESTILACIÓN DE LAS MUESTRAS DE PIRÓLISIS

La destilación del aceite de pirólisis se realizó en tres fases por cada muestra; fase 1 de 40 a 75°C, fase 2-de 75 a 95°C y la fase 3 de 95 a 110°C; en cada fase se registró el tiempo en escala de 10 minutos y la temperatura de los gases, tal como se detalla en las tablas 5 y 6. A continuación se muestran las gráficas de los diagramas de dispersión por fase.

- ***Muestra 1-Fase 1. Temperatura-tiempo***

La fase 1 de destilación se llevó a cabo en aproximadamente 1 hora, durante ese rango de tiempo y con una frecuencia de 10 minutos se anotaron las temperaturas de los gases. A partir del minuto 20 y con una temperatura de gases de 67°C, se obtuvo los primeros ml de fracción de combustible, este proceso continuó hasta el minuto 60 alcanzando el pico máximo de temperatura de gases a los 76°C. Se pudo determinar que, durante ese rango de tiempo se alcanzó la mayor producción de fracción de combustible; durante todo el proceso se obtuvo 55ml de combustible, los datos de los tiempos y temperaturas se muestran en la figura 26.

Figura 26. Muestra 1-Fase 1. Temperatura-tiempo

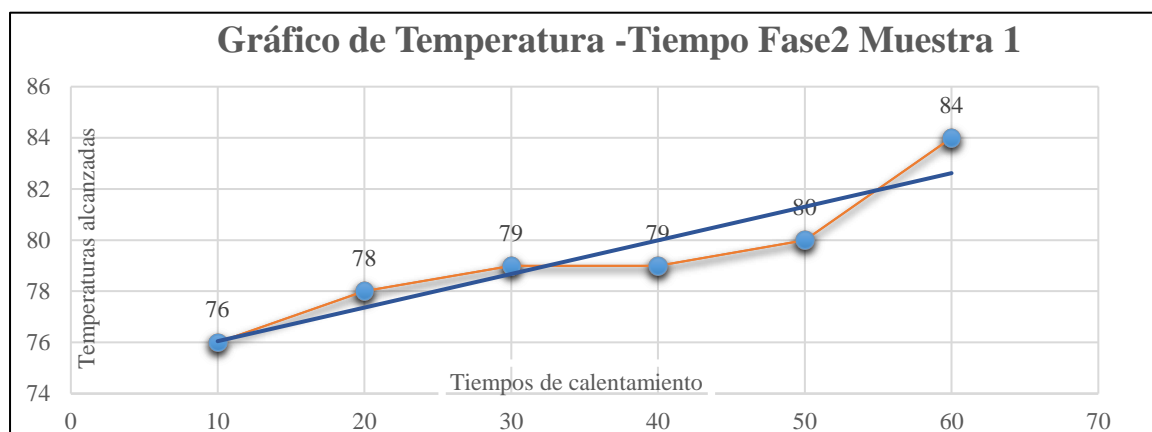


Fuente: Autores

- ***Muestra 1-Fase 2. Temperatura-tiempo***

La fase 2 de destilación se llevó a cabo en aproximadamente 1 hora, durante ese rango de tiempo y con una frecuencia de 10 minutos se anotaron las temperaturas de los gases. A partir del minuto 10 y con una temperatura de gases de 76°C, se obtuvo los primeros ml de fracción de combustible de la fase 2, este proceso continuó hasta el minuto 60 alcanzando el pico máximo de temperatura de gases a los 84°C. Se pudo determinar que, a partir del minuto 40 con una temperatura de gases de 79° C hasta el minuto 60 con una temperatura de gases de 84°C se alcanzó la mayor producción de fracción de combustible, durante todo el proceso se obtuvo 100ml de combustible, los datos de los tiempos y temperaturas se muestran en la figura 27.

Figura 27. Muestra 1-Fase 2. Temperatura-tiempo

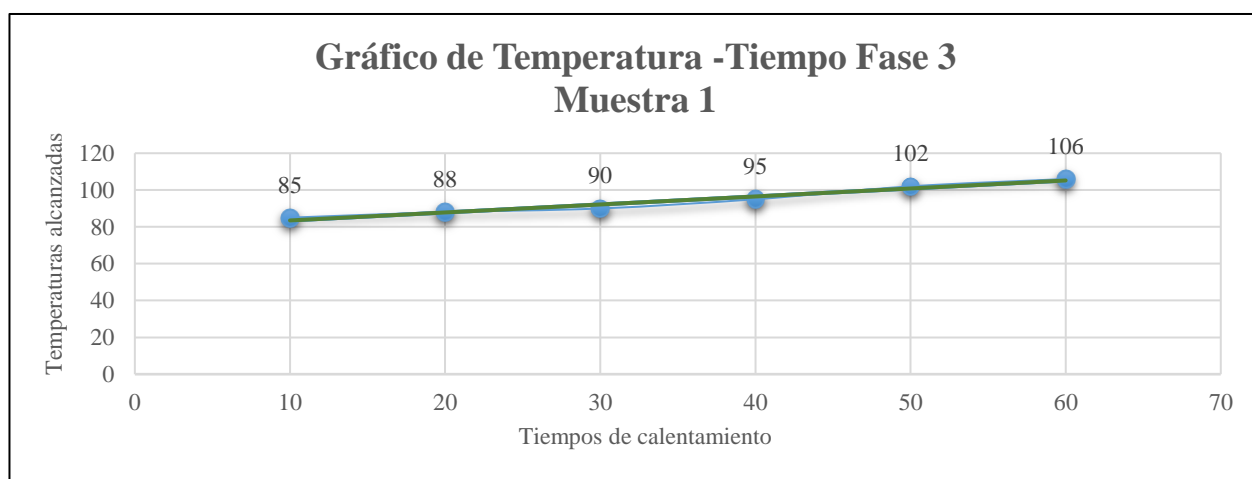


Fuente: Autores

- ***Muestra 1-Fase 3. Temperatura-tiempo***

La fase 3 de destilación se llevó a cabo en aproximadamente 1 hora, durante ese rango de tiempo y con una frecuencia de 10 minutos se anotaron las temperaturas de los gases. A partir del minuto 10 y con una temperatura de gases de 85°C, se obtuvo los primeros ml de fracción de combustible de la fase 3, este proceso continuó hasta el minuto 60 alcanzando el pico máximo de temperatura de gases a los 106°C. Se pudo determinar que, a partir del minuto 30 con una temperatura de gases de 90°C hasta el minuto 60 con una temperatura de gases de 106°C se alcanzó la mayor producción de fracción de combustible, durante todo el proceso se obtuvo 50ml de combustible, los datos de los tiempos y temperaturas se muestran en la figura 28.

Figura 28. Muestra 1-Fase 3.Temperatura-tiempo

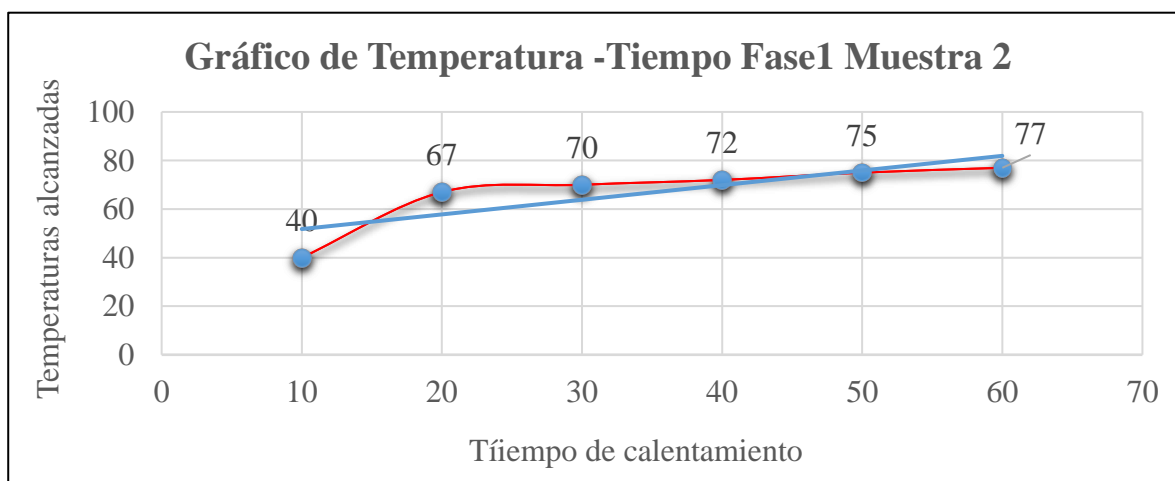


Fuente: Autores

- ***Muestra 2-Fase 1. Temperatura-tiempo***

La fase 1 de destilación se llevó a cabo en aproximadamente 1 hora, durante ese rango de tiempo y con una frecuencia de 10 minutos se anotaron las temperaturas de los gases. A partir del minuto 10 y con una temperatura de gases de 40°C, se obtuvo los primeros ml de fracción de combustible de la fase 1, este proceso continuó hasta el minuto 60 alcanzando el pico máximo de temperatura de gases a los 77°C. Se pudo determinar que, a partir del minuto 20 con una temperatura de gases de 67°C hasta el minuto 60 con una temperatura de gases de 77°C se alcanzó la mayor producción de fracción de combustible, durante todo el proceso se obtuvo 55 ml de combustible, los datos de los tiempos y temperaturas se muestran en la figura 29.

Figura 29. Muestra 2-Fase 1.Temperatura-tiempo

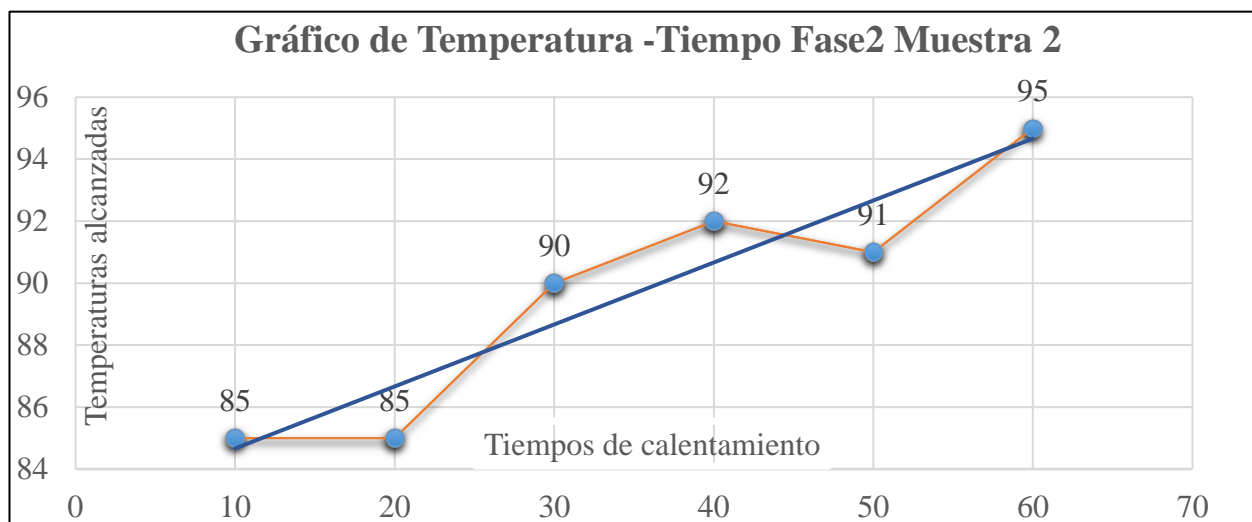


Fuente: Autores

- ***Muestra 2-Fase 2. Temperatura-tiempo***

La fase 2 de destilación se llevó a cabo en aproximadamente 1 hora, durante ese rango de tiempo y con una frecuencia de 10 minutos se anotaron las temperaturas de los gases. A partir del minuto 20 y con una temperatura de gases de 85°C, se obtuvo los primeros ml de fracción de combustible de la fase 2, este proceso continuó hasta el minuto 60 alcanzando el pico máximo de temperatura de gases a los 95°C. Se pudo determinar que, a partir del minuto 20 con una temperatura de gases de 85°C hasta el minuto 40 con una temperatura de gases de 92°C se tuvo una tendencia de crecimiento y mayor producción de fracción de combustible, al minuto 50 la temperatura de los gases disminuyó a 91°C, después de 10 minutos la temperatura de los gases ascendió a los 95°C, durante todo el proceso se obtuvo 50 ml de combustible, los datos de los tiempos y temperaturas se muestran en la figura 30.

Figura 30. Muestra2- Fase2.Temperatura-tiempo



Fuente: Autores

- *% de Rendimiento de las fracciones de destilación*

Para la muestra 1 se utilizó 250 ml de alcohol potable al 96% como disolvente y, se obtuvo 250 ml de aceite de pirolisis; en la fracción 1 se obtuvo 55 ml, fracción 2, 100 ml y en la fracción 3 se obtuvo 50 ml. Al reemplazar estos datos en la ecuación se obtienen los siguientes resultados.

Figura 31. ml de aceite de pirolisis de la muestra 1



Fuente: Autores

$$\text{Ec. 2 \% de Rendimiento } m1 = \frac{\text{ml de la fracción obtenida}}{\text{ml de de la muestra} + 250\text{ml de disolvente}} * 100\%$$

$$\text{Fracción 1} = \frac{55\text{ml}}{250\text{ml} + 250\text{ml}} * 100\% = 11\%$$

$$\text{Fracción 2} = \frac{100\text{ml}}{250\text{ml} + 250\text{ml}} * 100\% = 20\%$$

$$\text{Fracción 3} = \frac{50\text{ml}}{250\text{ml} + 250\text{ml}} * 100\% = 10\%$$

Para la muestra 2 no se utilizó disolvente y, se obtuvo 400 ml de aceite de pirolisis; en la fracción 1 se obtuvo 55 ml y fracción 2, 50 ml. Al reemplazar estos datos en la ecuación se obtienen los siguientes resultados.

Figura 32. ml de aceite de pirolisis de la muestra 2



Fuente: Autores

$$\text{Ec. 3} \quad \% \text{ de Rendimiento } m2 = \frac{\text{ml de la fracción obtenida}}{\text{ml de la muestra 2}} * 100\%$$

$$\text{Fracción 1} = \frac{32\text{ml}}{400\text{ml}} * 100\% = 8\%$$

$$\text{Fracción 2} = \frac{30\text{ml}}{400\text{ml}} * 100\% = 7.5\%$$

4.3. ANÁLISIS ORGANOLÉPTICO

4.3.1. ASPECTOS SENSORIALES: COLOR Y OLOR DE LA MUESTRA OBTENIDA EN LA PIRÓLISIS

La fracción líquida obtenida con el proceso de pirólisis presenta dos fases de colorimetría tal como se muestra en la figura 33 y 34. La muestra 1 presenta un color beige y un olor característico a tolueno, y a plástico quemado. La muestra 2 presenta un color negro oleoso y un olor ácido intenso parecido a la acetona.

Figura 33. Muestra1- Aceite de pirólisis obtenido



Fuente: Autores

Figura 34. Muestra2-Acite de pirolisis obtenido



Fuente: Autores

4.3.2. ASPECTOS SENSORIALES: COLOR Y OLOR DE LAS FRACCIONES LÍQUIDAS OBTENIDAS EN LA DESTILACIÓN CON DISOLVENTE DE ALCOHOL POTABLE AL 96%

En el proceso de destilación de las muestras obtenidas en la pirolisis se incorporó 249ml de alcohol potable al 96%, se obtuvo tres fracciones tomadas con base a las temperaturas de las tres fases de destilación, tal como se muestra en la figura 35.

- Fase 1: Fracción-Separación se da al alcanzar temperaturas entre (40-75°C)
- Fase 2: Fracción-Separación se da al alcanzar temperaturas entre (75-95°C)
- Fase 3: Fracción-Separación se da al alcanzar temperaturas entre (95-110°C)

Las fracciones líquidas obtenidas de la muestra 1, presentan tres fases de colorimetría. El líquido obtenido en la fase 1 tiene un color traslucido ligeramente verdoso y olor intenso a gasolina. El líquido obtenido en la fase 2 tiene un color amarillo claro y olor a gasolina volátil muy similar

al primero. Por otra parte, el líquido obtenido en la tercera fase presenta un color amarillo oscuro, menor olor de gasolina y mayor olor a plástico quemado.

Figura 35. Muestra1 - Fracciones líquidas de destilación



Fuente: Autores

4.3.3. ASPECTOS SENSORIALES: COLOR Y OLOR DE LAS FRACCIONES LÍQUIDAS OBTENIDAS EN LA DESTILACIÓN SIN DISOLVENTE

Las fracciones líquidas obtenidas de la muestra 2, presentan dos fases de colorimetría, tal como se muestra en la figura 36. El líquido obtenido en la fase 1 tiene un color blanquecino turbio ligeramente amarillento con presencia de agua y olor a plástico quemado. El líquido obtenido en la fase 2 tiene un color amarillo oscuro debido a las densidades y olor a plástico quemado. Por otra parte, la tercera fracción no se pudo destilar debido a la inestabilidad de la segunda muestra. Esto demuestra que es mejor utilizar un disolvente para mejorar el proceso de destilación y por ende la calidad del producto final.

Figura 36. Muestra 2-Fracciones líquidas obtenidas en el proceso de pirolisis



Fuente: Autores

4.4. RESULTADOS DE DENSIDAD, GRAVEDAD ESPECÍFICA Y GRAVEDAD API

4.4.1. DENSIDAD

Los resultados obtenidos en las pruebas de densidad se lograron por medio del equipo DENSITO de la marca METTLER TOLEDO, y se realizaron según se planteó en la metodología del apartado 3.6.2. Los resultados se muestran en la tabla 8 que corresponden a las fracciones 1, 2 y 3, destiladas de las muestras M1. Estos valores son 0,783g/cm³; 0,804g/cm³ y 0,813g/cm³ respectivamente. Los resultados de la densidad de las fracciones de la muestra M2 se plasman en la tabla 9 y sus valores son 0,79g/cm³ y 0,814g/cm³. Las densidades de las fracciones obtenidas se asemejan mucho a la densidad de los combustibles tales como keroseno como muestra la tabla 11, y diésel según los rangos establecidos por Chevron en su documento Diesel Fuels Technical Review. Por tanto, se determinó que las fracciones obtenidas se pueden distinguir como keroseno y diésel dejando en claro que son combustibles aptos para su uso.

Tabla 9. Densidades de las fracciones de combustible obtenidas de la muestra 2

T° 24°C	FRACCION 1	FRACCION 2
g/cm ³	0,79	0,814

4.4.2. CALCULO GRAVEDAD ESPECÍFICA

Para calcular la gravedad específica se utilizó la ecuación **Ec.4**, y los resultados obtenidos se detallan en la tabla 10.

Tabla 10. Gravedad especifica de las fracciones

GS	FRACCION 1	FRACCION 2	FRACCION 3
M1	0,785	0,806	0,815
M2	0,792	0,816	

Fuente: Autores

Los resultados obtenidos se pueden comparar con los valores de la tabla 12 (speight,2002) citado por (Alway & Sri Rachmania Juliastuti, 2019) , estos resultados se aproximan a los valores del kerosene y diésel .Chevron hace mención en su documento Diesel Fuels Technical Review, que la gravedad específica y la densidad, a 60°F (15,6°C), está entre 0,88 y 0,82.

Estas densidades presentan una mínima variación con los valores de la tabla 12, puede estar relacionado a la temperatura ambiental o al equipo de destilación.

4.4.3. GRAVEDAD API

Para la medición de la gravedad API se utilizó el equipo DENSITO, según la metodología del apartado 3.6.3 los resultados se visualizan en la tabla 11. Los grados API obtenidos son 47,65; 43,12 y 40,89 que corresponden a las fracciones obtenidas de la muestra M1. Los resultados de las fracciones de la muestra M2 son 43,92 y 40,16 respectivamente. Los resultados obtenidos se pueden comparar con los valores de la tabla 12 (Speight,2002) citado por (Alway & Sri Rachmania Juliastuti, 2019) , estos se aproximan a los valores del kerosene y diésel .Chevron hace mención en su documento Diesel Fuels Technical Review, que la gravedad API a 60°F (15.6°C) para el combustible diésel está entre 30 y 42 .

Tabla 11. Gravedad API de la muestra 1 y 2

	FRACCION 1	FRACCION 2	FRACCION 3
API M1	47,65°	43,12°	40,89°
API M2	43,92°	40,16°	

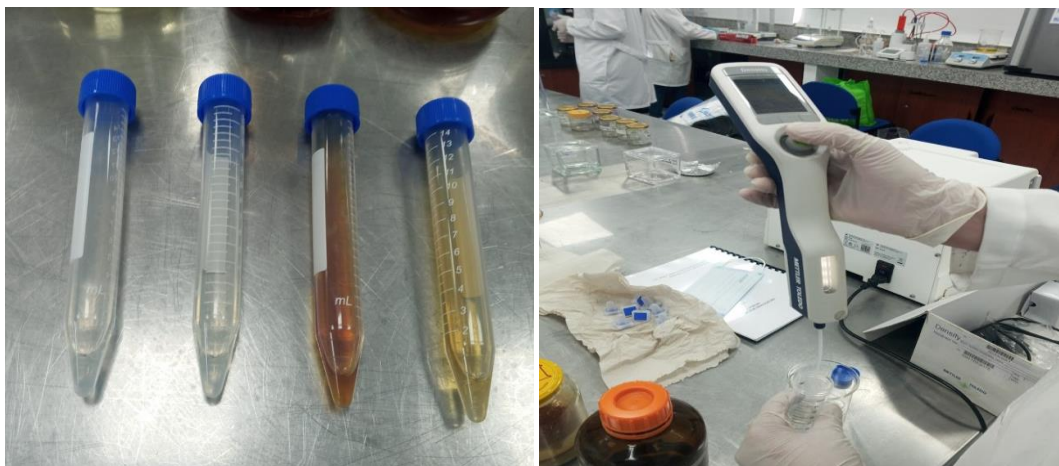
Fuente: Autores

Tabla 12. Gravedad específica y gravedad API del petróleo crudo y productos seleccionados

Material	Gravedad Específica	Gravedad API
	15.6°C / 15.6°C	grados
Crudo	0,65 - 1,06	87 - 2
Gasolina	0,70 - 0,77	70 - 52
Keroseno	0,77 - 0,82	52 - 40
Aceite lubricante	0,88 - 0,98	29 - 13
Residual y residual agrietado	0,88 - 1,06	29 - 2

Fuente: (Speight,2002)

Figura 37. Muestras sometidas a análisis



Fuentes: Autores

4.5. REDUCCIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS

Para el cálculo de la reducción de residuos plásticos se utilizaron las ecuaciones **Ec.5**, **Ec.6**, **Ec.7** y **Ec.8** según se planteó en la metodología del apartado 3.7. Los resultados se muestran en la tabla 13 que corresponden al porcentaje de carbón obtenido, porcentaje de aceite de pirolisis y porcentaje de gases. El porcentaje de carbón obtenido para la muestra M1 se calculó con 50,3 g de masa neta de carbón de pirolisis y 450g de masa de residuos plásticos, para la muestra M2 se calculó con 81,2g de masa neta de carbón de pirolisis y 800g de masa de residuos plásticos; el porcentaje de aceite de pirolisis obtenido, para la muestra M1 se calculó con 195,72g de masa neta de la muestra y 450g de masa de residuos plásticos, para la muestra M2 se calculó con 337,89g de masa neta de la muestra y con 800g de masa de residuos plásticos; el porcentaje de gases se calculó según la **Ec.8**. Con base en los resultados obtenidos, se determinó que la cantidad restante de residuos plásticos es de 0, lo que significa que en la pirolisis térmica los residuos plásticos se aprovechan un 100%, por ende, se puede determinar que mediante el proceso de pirolisis se reduce la contaminación generada por residuos plásticos.

Tabla 13. Reducción de residuos plásticos

	% de Carbón Obtenido	% de Aceite de pirólisis	% de Gases	Cantidad restante de residuos plásticos
M1	11%	44%	45%	0,00
M2	10%	42%	48%	0,00

Fuente: Autores

PRESUPUESTO

Material	Medidas	Precio	Cantidad	Precio Total
Plancha de acero 2mm	3 x 2,4 mt	\$ 35,00	1 ud	\$ 35,00
Ladrillos refractarios 1350 °C	N/a	\$ 4,80	25 ud	\$ 120,00
Niple de acero galvanizado 1/2	4"	\$ 2,00	10 ud	\$ 20,00
Cilindro vacío de gas refrigerante R-134	N/a	\$ 10,00	1 ud	\$ 10,00
Arena de Sílice	15 Kg	\$ 20,00	1 ud	\$ 20,00
Cemento refractario	5 kg	\$ 25,00	1 saco	\$ 25,00
Termostato Rex C100	N/a	\$ 55,00	1 ud	\$ 55,00
Resistencia vitroceramica de 1800W	N/a	\$ 120,00	1 ud	\$ 120,00
Sensor termocupla Tipo k	N/a	\$ 20,00	1 ud	\$ 20,00
Relay estado sólido tipo SSR-40	N/a	\$ 20,00	1 un	\$ 20,00
Pernos M10 X 25	M10 x 25	\$ 1,50	12 un	\$ 18,00
Plancha de acero 5mm	1m ²	\$ 20,00	1 un	\$ 20,00
Empaquetadura de asbesto	320 x 320	\$ 16,50	1 un	\$ 16,50
			TOTAL	\$ 499,50

Fuente: Autor

CRONOGRAMA

Actividades	Meses (semanas)							
	Julio				Agosto			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Recolección y tratamiento de los residuos plásticos.	■							
Experimentación de la pirolisis.		■						
Destilación del aceite de pirolisis obtenido.			■					
Evaluación de la fracción líquida obtenida.				■	■			
Análisis e interpretación de resultados.						■	■	
Presentación de la tesis							■	

Fuente: Autor

CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos, el proceso de pirolisis térmica y destilación aplicado a residuos plásticos ha demostrado ser una vía eficaz para obtener combustible líquido, presentando una alternativa prometedora en el manejo sostenible de desechos plásticos y en la generación de recursos energéticos.

Para llegar a dichos resultados los plásticos se sometieron a la pirolisis térmica siendo estos transformados en subproductos tales como carbón pirólico, aceite pirólico y gases no condensables con un porcentaje de rendimiento de 11%, 44% y 45% para la primera experimentación respectivamente y para la segunda experimentación se obtuvieron resultados de rendimiento muy similares lo cual indicó una concordancia en el proceso.

Los aceites pirólicos obtenidos se destilaron según los métodos propuestos, para la muestra M1 el aceite pirólico se mezcló con alcohol potable al 96% dando como resultado 3 fracciones, cada una distinta de otra y para la muestra M2 no se utilizó solvente dando como resultado 2 fracciones, esto evidencio que, al no utilizar un solvente, el aceite pirólico se vuelve más inestable por sobre los 95°C. Los rendimientos de las fracciones de combustible obtenidas de la muestra M1 fueron de 11%, 20% y 10% y corresponden a 55ml en la fracción 1, 100ml en la fracción 2 y 50ml de la fracción 3. Para la muestra M2 los rendimientos de las fracciones fueron menores y se hizo evidente la falta de una columna de fraccionamiento.

Las fracciones obtenidas se sometieron a diversos análisis de propiedades físicas tales como análisis organolépticos, densidad, gravedad específica y gravedad API. El análisis organoléptico demostró las diferencias de color que van de un transparente en la fracción 1 a un

amarillo en la fracción 3, también demostró tener un olor casi idéntico a la gasolina sobre todo en la fracción 1.

La densidad de las fracciones de combustibles obtenidos fue de 0,783g/cm³; 0,804g/cm³; 0,813g/cm³, con una gravedad específica de 0,785; 0,806; 0,815 y grados API de 47,65°; 43,12°; 40,89° respectivamente, lo que indicó, al comprobar los resultados con las fuentes, que los combustibles obtenidos se asemejan en su equivalencia al Kerosene y Diesel.

Por último, el proceso de pirolisis térmica y destilación no solo ofrece una solución viable para transformar plásticos en combustible, sino que también aborda de manera significativa el problema de la contaminación ambiental causada por estos residuos. Al convertir los desechos plásticos en un recurso útil, se disminuye la presencia de plásticos no degradables en el entorno, contribuyendo así a la conservación del medio ambiente.

RECOMENDACIONES

Triturar los residuos plásticos previamente a la ejecución del proceso de pirolisis, dado que esto mejora la eficiencia en la transferencia de calor, acorta el tiempo de la reacción y optimiza la utilización del espacio en el reactor.

Aislar los conductos que conectan el reactor con el condensador para evitar la pérdida de energía y prevenir las formaciones cerosas dentro del conducto.

Mantener el lugar de trabajo siempre limpio y alejado de productos inflamables.

Utilizar un termómetro de vapor de gases con un rango superior a los 120 grados para tener mayor precisión en las lecturas de la temperatura de los gases.

Se recomienda utilizar un destilador con columna de fraccionamiento para obtener mayor rendimiento de las fracciones obtenidas.

Usar hexanol como disolvente, en lugar de alcohol potable al 96%.

Por seguridad, durante la experimentación de la pirolisis usar mangueras que permitan extraer el gas generado del lugar de trabajo para evitar intoxicaciones.

Se recomienda hacer pruebas de octanaje, pruebas específicas para diésel y keroseno.

BIBLIOGRAFÍA

Aracil Sáez, I. (2008, Julio). Formación de Contaminantes y Estudio Cinético en la Pirólisis y Combustión de Plásticos (PE, PVC y PCP). Tesis Doctoral. Alicante: Universidad de Alicante.

Almeida Gamarra, N. (2006). Ensayos preliminares de pirólisis de residuos sólidos municipales para obtención de biocombustibles. Bogotá.

Álvarez, D. O. (s/f). Plástico. Concepto. Recuperado el 6 de agosto de 2023, de <https://concepto.de/plastico/>

Alesmar, L., Rendón, N., & Korody, M. E. (2008). Diseños de mezcla de tereftalato de polietileno (pet) - cemento. *Revista De La Facultad De Ingenieria*, 23(1), 76–86.

[Http://ve.scielo.org/scielo.php?Script=sci_arttext&pid=S0798-40652008000100006](http://ve.scielo.org/scielo.php?Script=sci_arttext&pid=S0798-40652008000100006)

Alcantara, L. (2012, mayo). Polimeros. Monografias.com.

[Https://www.monografias.com/trabajos93/sobre-los-polimeros/sobre-los-polimeros.shtml](https://www.monografias.com/trabajos93/sobre-los-polimeros/sobre-los-polimeros.shtml) .

Consultado el 04 de septiembre del 2021

Beltrán, M. (2011). Tema 1. Estructura y propiedades de los polímeros. *Tecnología de los Polímeros*.

Benavente, R. (1997). Polímeros amorfos, semicristalinos, polímeros cristales líquidos y orientación.

Beltrán, M. (2011). Tema 2. Tipos de plásticos, aditivación y mezclado. *Tecnología de los Polímeros*.

Díaz Caleño, F. (2020). EVALUACIÓN DE LA PIRÓLISIS COMO UN MÉTODO PARA LA OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS A PARTIR DE LOS PLÁSTICOS GENERADOS EN LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE. Universidad Autónoma de Occidente.

<https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/12340/T09200.pdf;jsessionid=E6C67D8330315BEBA957FF0E25CAC99D?Sequence=5>. (2021,20 agosto)

FRANTA, I., (1989). "Elastomers and Rubber Compounding Materials", 607.

Gómez Serreto, J. (2016). *Diagnóstico del impacto del plástico - botellas sobre el medio ambiente: un estado del arte*. Universidad Santo Tomás.

Hernández, M. L. (2013). EL impacto de los plástico en el Medio Ambiente . México: UAEM.

Juste, I. (2020, enero 27). TIPOS de PLÁSTICOS - Guía de Clasificación. *Ecologiaverde.com*.

<https://www.ecologiaverde.com/tipos-de-plasticos-1732.html>

Juárez Varón, D., Balart Gimeno, R. A., Ferrándiz Bou, S., & García Sanoguera, D. (2012).

Estudio, análisis y clasificación de elastómeros termoplásticos. *3c Tecnología*, (2), 22-41.

Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson educación.

López Carrasquero, F. (2004). Fundamentos de polímeros. *Escuela Venezolana para la enseñanza de la Química. Mérida*, 49-51.

Lojano Quiroja, F. D. (2020). Obtención de combustible a partir del tereftalato de polietileno (PET) a escala de laboratorio mediante proceso de pirólisis y gasificación. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18901/1/UPS-CT008803.pdf>

Moltó, E. (2006, 1 junio). La pirólisis, una salida para los residuos plásticos y orgánicos. EL PAIS. https://elpais.com/diario/2004/06/02/futuro/1086127204_850215.html. Consultado el 28 de agosto del 2021)

Noguera, I. B. (2020, mayo 22). Definición de destilación. *Ingeniería Química Reviews*. <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/05/destilacion-definicion.html>

Pasquali, R. C., Chiappetta, D. A., & Bregni, C. (2005). Los copolímeros en bloques anfifílicos y sus aplicaciones farmacéuticas. *Acta farmacéutica bonaerense*, 24(4), 610.

Pérez Porto, J., Merino, M. (9 de mayo de 2013). *Polietileno - Qué es, definición y concepto*.

Definicion.de. Última actualización el 26 de junio de 2015. Recuperado el 5 de agosto de 2023 de <https://definicion.de/polietileno/>

Proaño, O., & Crespo, S. (2009). Obtención de combustibles a partir de residuos plásticos. *Revista Politécnica*, 137–144.

Proaño, O., & Crespo, S. (2016). Obtención de combustibles a partir de residuos plásticos. *Revista Politécnica*, 1–5. Consultado el 2 de agosto del 2023

Políticas Públicas: Generación de residuos de plástico: la importancia de la prevención. (s/f).

Edu.ar. Recuperado el 11 de agosto de 2023, de

<http://www.politicaspUBLICAS.uncu.edu.ar/articulos/index/generacion-de-residuos-de-plastico-la-importancia-de-la-prevencion>

Rejas, L., Carreón, B., Ortiz, M., Llanes, L., & Copa, M. (2015, 15 abril). Generación de combustibles Líquidos a partir de residuos plásticos. Scielo.

Http://www.scielo.org.bo/scielo.php?Script=sci_arttext&pid=S2225-87872015000100005.

Consultado el 6 de septiembre del 2021

Reinecke, H. (2004). Aspectos ecológicos del PVC: un análisis objetivo. *Revista de plásticos modernos: Ciencia y tecnología de polímeros*, (572), 146-149.

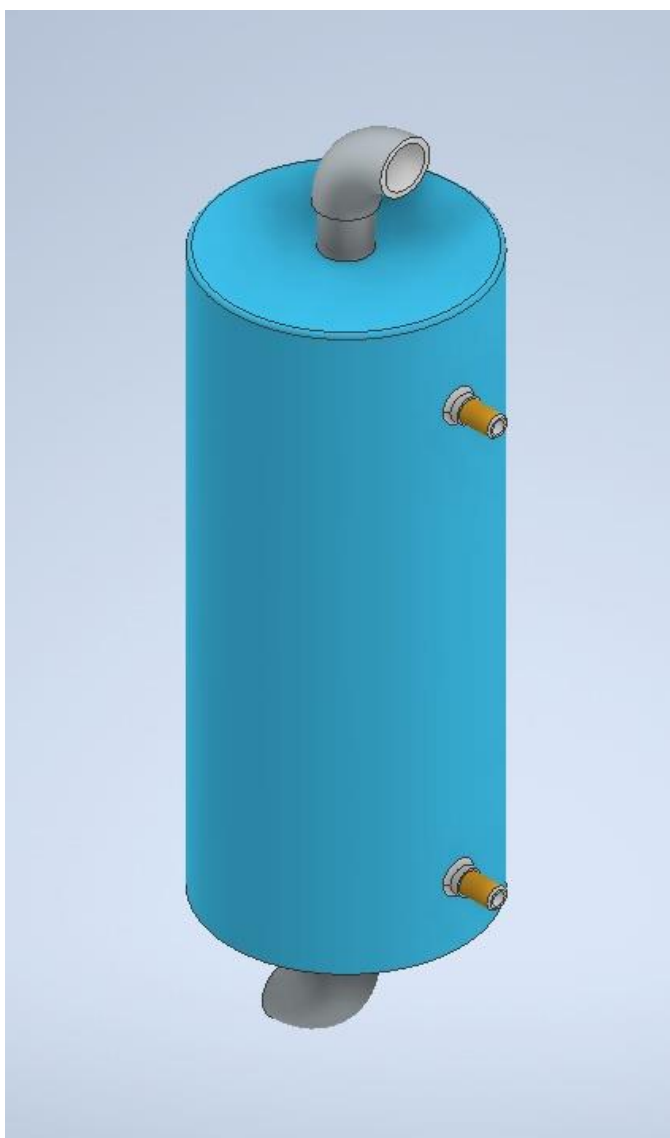
Taípe Andagua, J. G. (2020, 26 agosto). Obtención de combustibles a partir de residuos de polipropileno reciclado, mediante pirólisis. ESPE.

<Http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/23134/1/T-ESPEL-IPE-0064.pdf>

ANEXOS

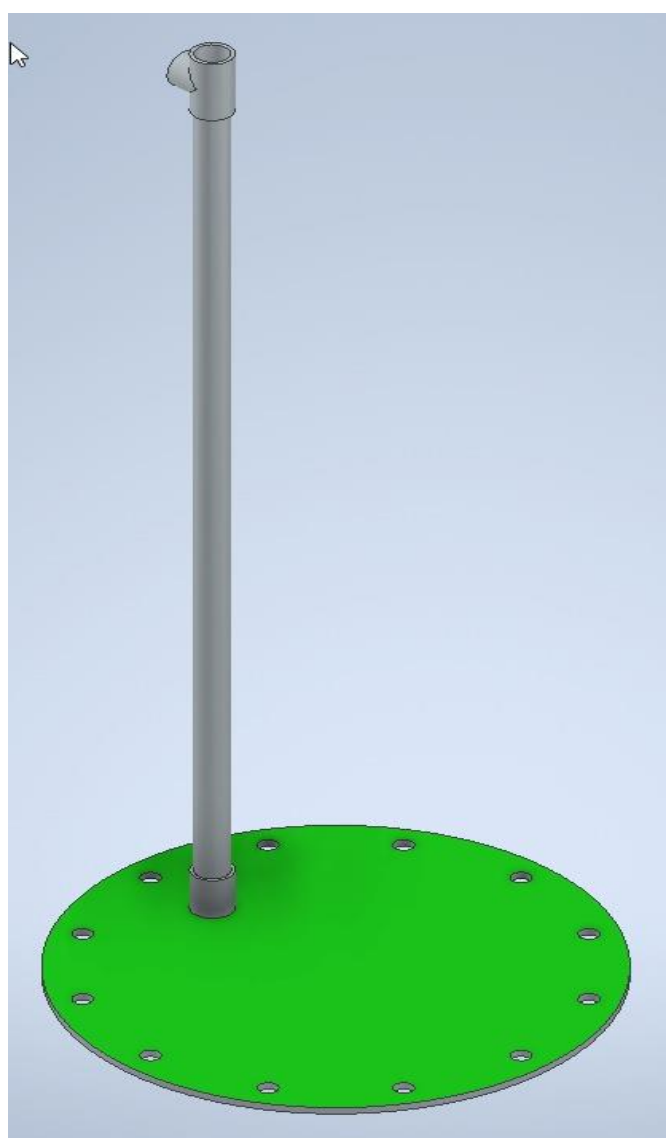
A continuación, se presentan las piezas que componen el equipo de pirolisis mediante su diseño en Inventor Professional 2024.

Figura 38. Condensador



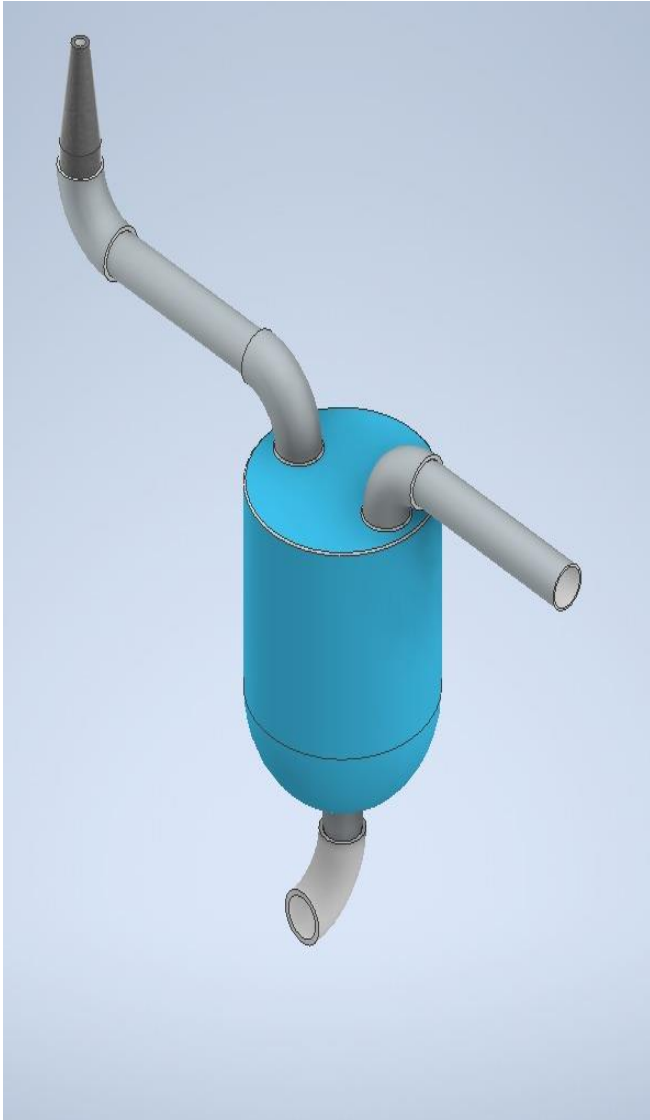
Fuente: Autores

Figura 39. Torre de enfriamiento y tapa del reactor



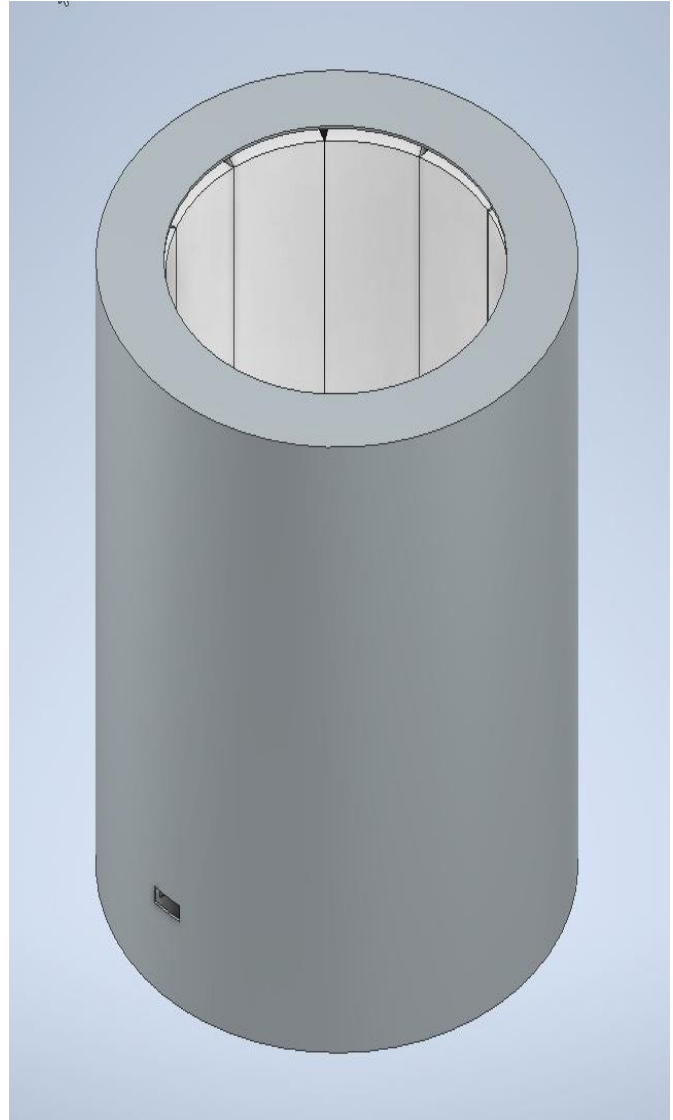
Fuente: Autores

Figura 40. Contenedor de combustible



Fuente: Autores

Figura 41. Recámara térmica



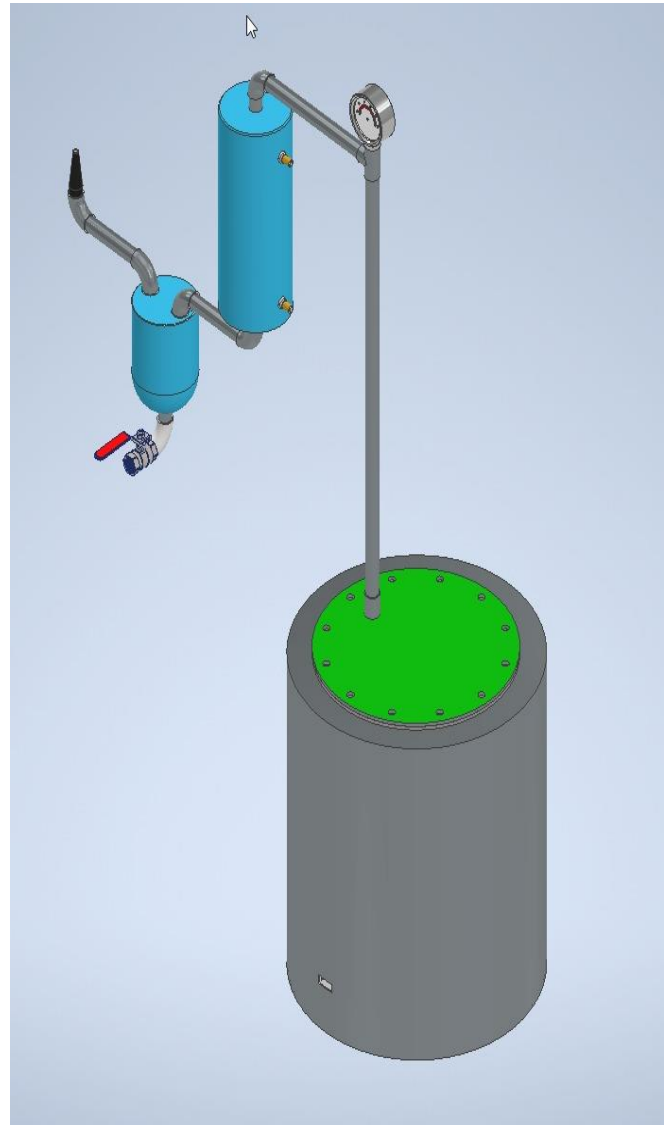
Fuente: Autores

Figura 44. Manómetro

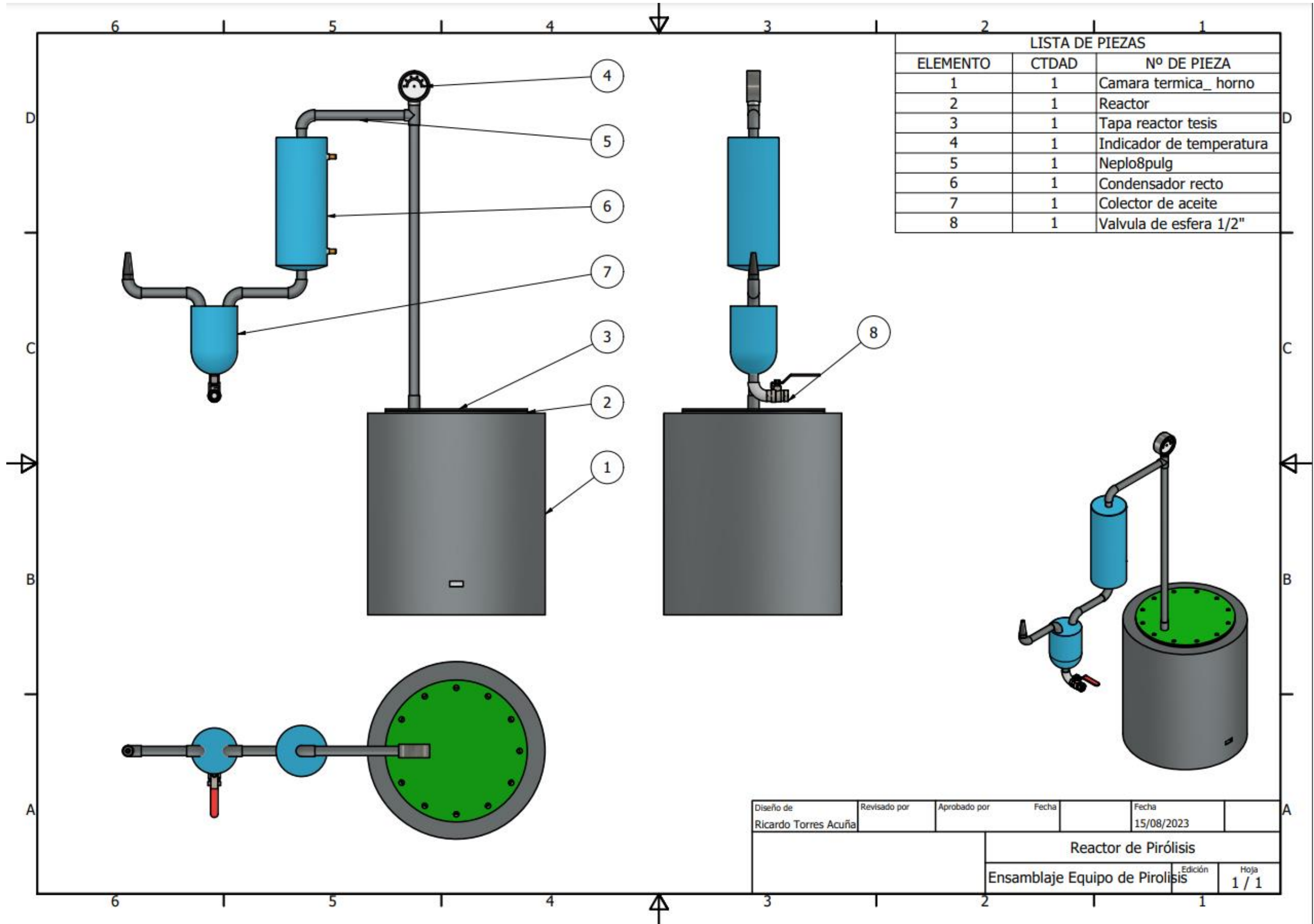


Fuente: Autores

Figura 42. Equipo de pirolisis ensamblado

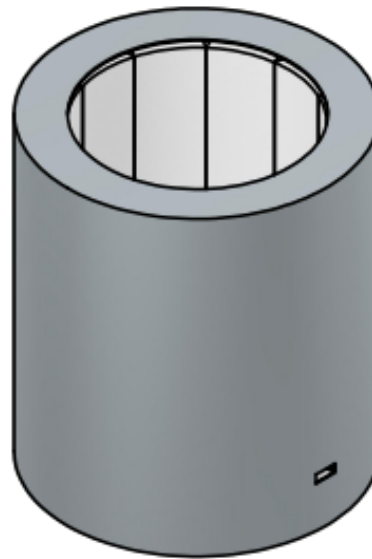
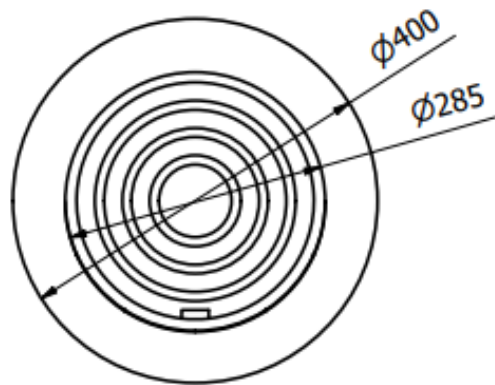
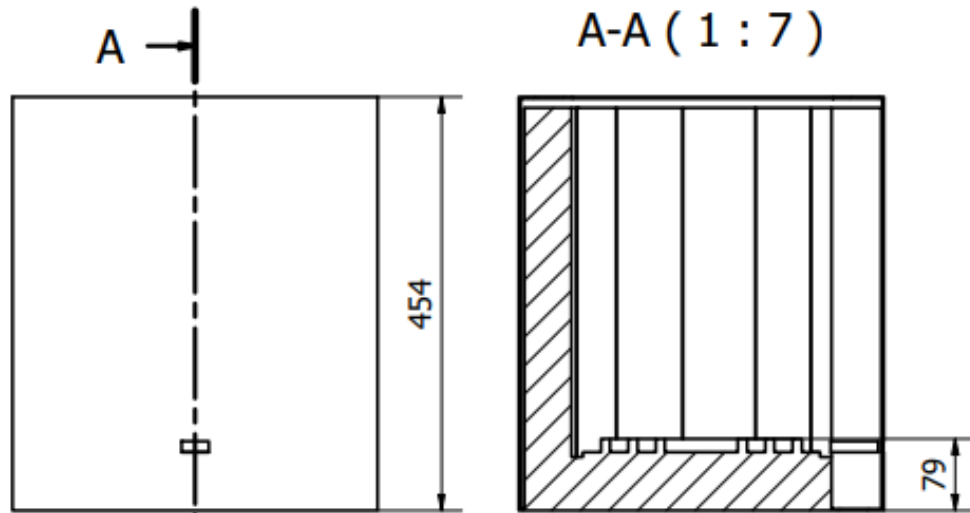


Fuente: Autores



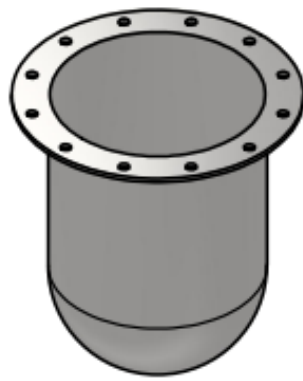
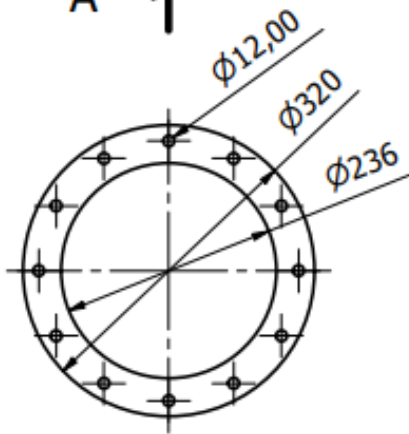
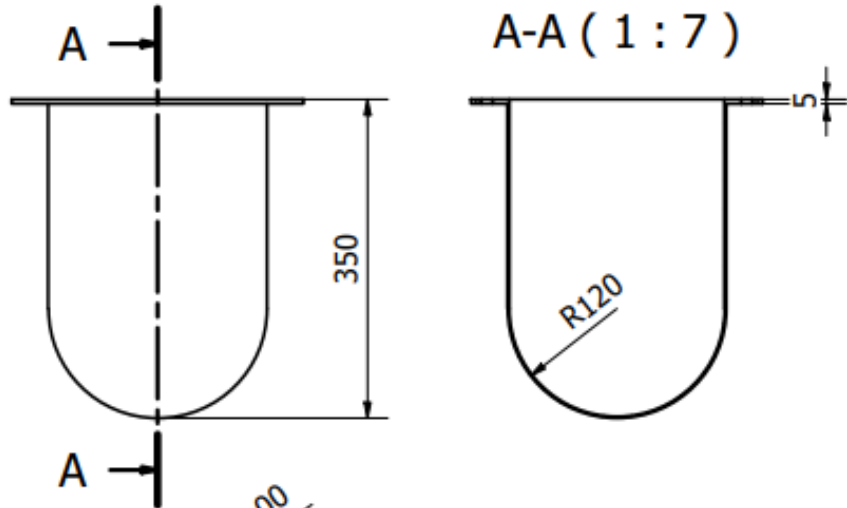
Diseño de Ricardo Torres Acuña	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 15/08/2023
			Reactor de Pirólisis	
			Edición	Hoja 1 / 1
			Ensamblaje Equipo de Pirólisis	

LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	Camara termica_ horno



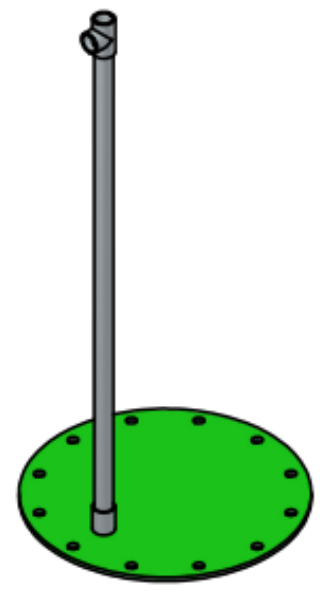
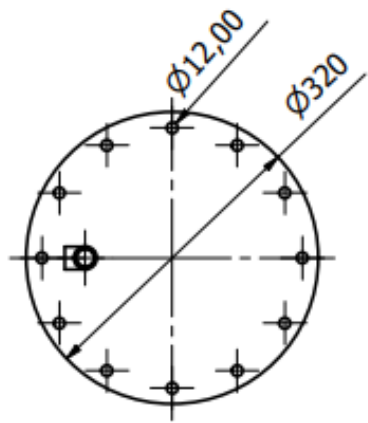
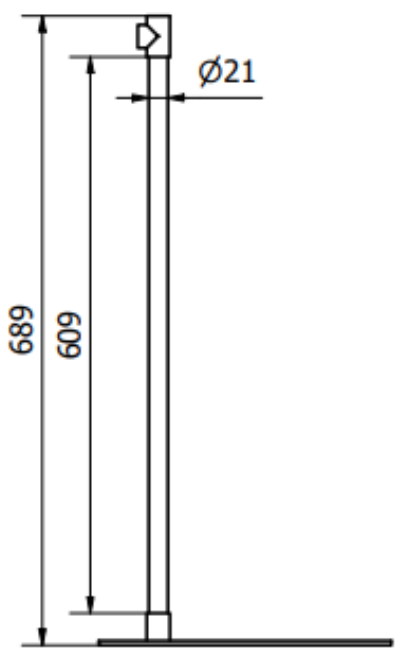
Diseño de Ricardo Torres Acuña	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 14/08/2023	
Camara termica_ horno			Edición	Hoja 1 / 1	

LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	reactor



Diseño de Ricardo Torres Acuña	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 14/08/2023	
			reactor		Edición
					Hoja 1 / 1

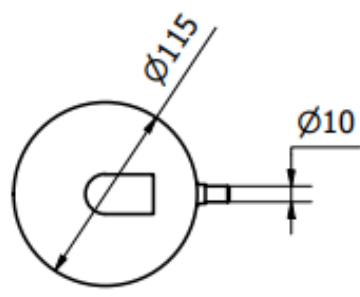
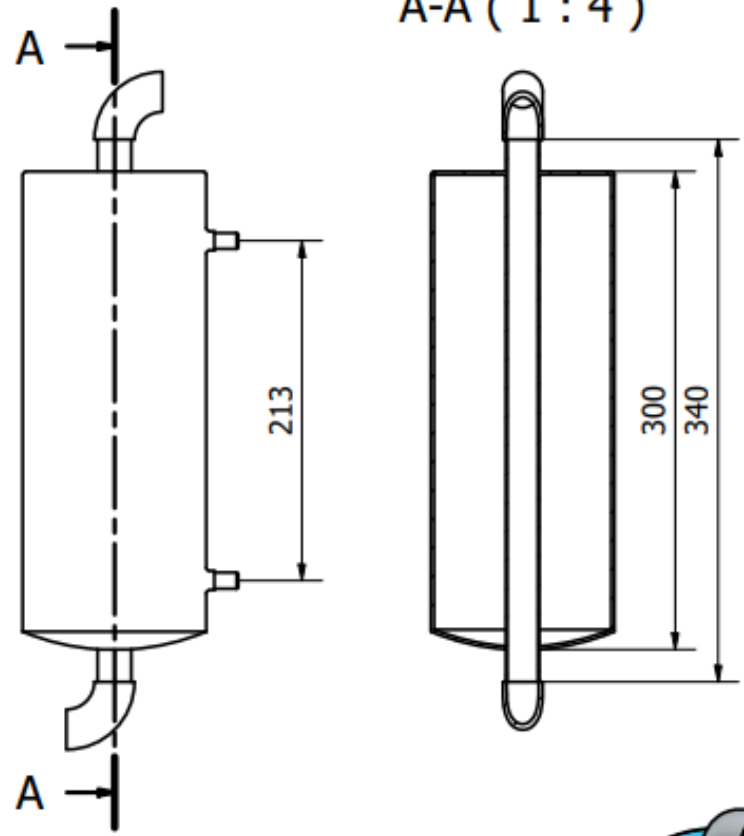
LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	Tapa reactor tesis



Diseño de Ricardo Torres Acuña	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 14/08/2023
Tapa reactor			Edición	Hoja 1 / 1

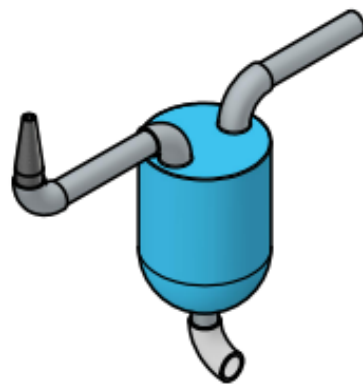
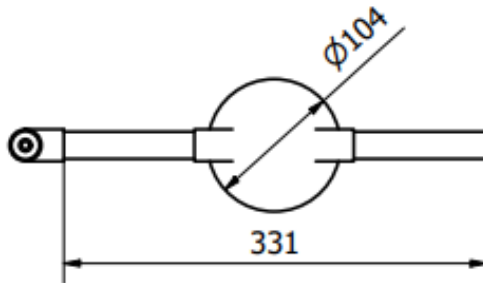
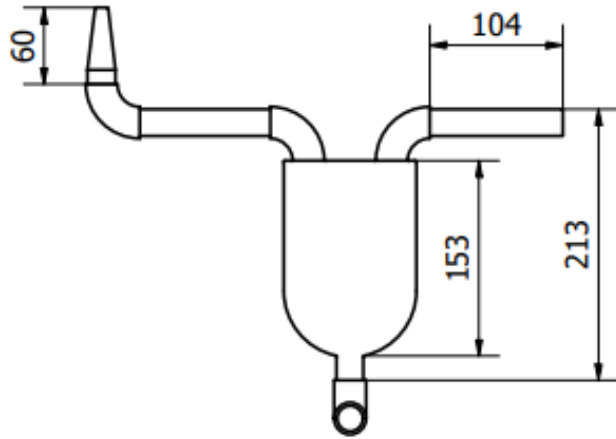
LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	Condensador recto

A-A (1 : 4)



Diseño de Ricardo Torres Acuña	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 14/08/2023
			Edición	Hoja 1 / 1
			Condensador recto	





LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	Colector de aceite


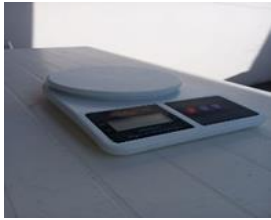














Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	
Ricardo Torres Acuña				14/08/2023	
			Edición	Hoja	
				1 / 1	

Colector de aceite

Tabla 14. Materiales para la construcción del equipo de pirolisis




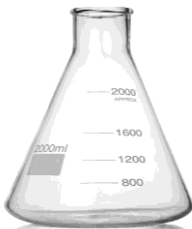


Cantidad	Nombre del equipo	Equipo	Equipo
1	Cilindro de gas refrigerante R-134 a vacío Figura A		
2	Cilindro de extintor de CO2 de 1.5 kg y 4 kg vacíos Figura B	<i>Figure A Cilindro R-134 a</i>	<i>Figure B Cilindro de extintor</i>
25	Ladrillos Refractarios 1350°C Figura C		
10	Niples de acero galvanizado ½ y 1/4 Figura D	<i>Figure C Ladrillo Refractarios</i>	<i>Figure D Niples de acero galvanizado ½ y 1/4</i>



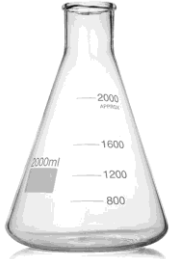

1	Plancha de metal de 2mm Figura E		
1	Balanza digital Figura F	<i>Figure E Plancha de metal de 2mm</i>	<i>Figure F Balanza digital</i>
1	Termostato Rex C100 Figura G		
1	Resistencia vitrocerámica de 3000W Figura H	<i>Figure G Termostato Rex</i>	<i>Figure H Resistencia vitrocerámica de 3000 W</i>
1	Sensor Termocupla Tipo K Figura I		
1	Relay estado sólido SSR-40 DA Figura J	<i>Figure I Sensor Termocupla Tipo K</i>	<i>Figure J Relay estado sólido SSR-40 DA I</i>
2	Niple cónico hexagonal bronce Figura k		
12	Pernos con Tuercas M10 x 25 mm Figura L	<i>Figure k Niple cónico hexagonal bronce</i>	<i>Figure L Pernos con Tuercas M10 x 25 mm</i>

1	Arena de Sílice 15 kg Figura M		
1	Cemento refractario 5 kg Figura N	<i>Figure M Arena de Sílice 15 kg</i>	<i>Figure N Cemento refractario 5 kg</i>
1	Tapa y brida de metal de 4mm Figura Ñ		
1	Llave de bola de 2 Pulgadas Figura O	<i>Figure Ñ Tapa y brida de metal</i>	<i>Figure O Llave de bola de 2 Pulgadas</i>
1	Termómetro de reloj Figura P		
1	Bomba de agua Figura P	<i>Figure P Termómetro de reloj</i>	<i>Figure Q Bomba de agua</i>

Fuente: Autores

Tabla 15. Materiales para la construcción del equipo de pirolisis

Cantidad	Nombre del instrumento	Instrumento	Instrumento
1	Adaptador con termómetro de mercurio Figura A		
2	Soporte base con varilla Figura B	<i>Figure A Adaptador con termómetro de mercurio</i>	
1	Cabeza de destilador Figura C		
1	Matraz de destilación Figura D		
1	Manta calefactora Figura E		
1	Mangueras del condensador Figura F		

1	Condensador recto Figura G		
1	Cola de destilación Figura H	<p><i>Figure G Condensador recto</i></p>	<p><i>Figure H Cola de destilación</i></p>
1	Recipiente colector Figura I		
1	Regulador de temperatura analógico Figura J	<p><i>Figure I Recipiente colector</i></p>	<p><i>Figure J Regulador de temperatura analógico</i></p>

Fuente: Autores