



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE GUAYAQUIL

CARRERA DE INGENIERIA INDUSTRIAL

**PROPUESTA DE ELABORACIÓN DE COMBUSTIBLE POR PIRÓLISIS A BASE DE
BOTELLAS DESECHADAS DE TEREFTALATO DE POLIETILENO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero Industrial

AUTORES: JOSUÉ ISMAEL ARIZAGA RICAURTE

JEREMY DUBERLI ESCALANTE IÑIGUEZ

TUTOR: ING. LUIS ENRIQUE MORÁN REYES, MSC.

Guayaquil – Ecuador

2023

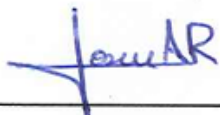
**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Nosotros, **Josué Ismael Arizaga Ricaurte** con documento de identificación No. **1205138058** y **Jeremy Duberli Escalante Iñiguez** con documento de identificación No. **0951751858**; manifestamos que:

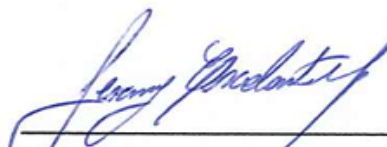
Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 22 de agosto del año 2023

Atentamente,



Josué Ismael Arizaga Ricaurte
1205138058



Jeremy Duberli Escalante Iñiguez
0951751858

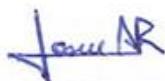
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, **Josué Ismael Arizaga Ricaurte** con documento de identificación No. **1205138058** y **Jeremy Duberli Escalante Iñiguez** con documento de identificación No. **0951751858**, 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: “Propuesta de elaboración de combustible por pirólisis a base de botellas desechadas de tereftalato de polietileno”, 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,



Josué Ismael Arizaga Ricaurte

1205138058



Jeremy Duberli Escalante Iñiguez

0951751858

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Ing. Luis Enrique Morán Reyes, MSc** con documento de identificación No. **0603117300**, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “PROPUESTA DE ELABORACIÓN DE COMBUSTIBLE POR PIRÓLISIS A BASE DE BOTELLAS DESECHADAS DE TEREFTALATO DE POLIETILENO”, realizado por **Josué Ismael Arizaga Ricaurte** con documento de identificación No. **1205138058** y por **Jeremy Duberli Escalante Iñiguez** con documento de identificación No. **0951751858**, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de **proyecto técnico** que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 22 de agosto del año 2023

Atentamente,



Ing. Luis Enrique Morán Reyes, MSc.
0603117300

DEDICATORIA

Este Proyecto se lo dedico en primer lugar a dios padre que siempre prevalece a mi lado y me dio la sabiduría, convicción y dedicación para definir cada etapa de mi tesis presentada para para mi aprobación de graduación. A mis padres quienes que me dieron consejos, alegrías, ideas, visión y objetivo para desarrollar y alcanzar objetivos, superar retos que se me presenten a lo largo de mi vida.

Josué Arizaga R

Con inmenso amor y gratitud, dedico mi proyecto de tesis a mis padres, mis pilares eternos. Cada línea escrita es un tributo a vuestra incansable dedicación y sacrificio. Vuestra guía y apoyo incondicional han sido mi motor en este viaje universitario. Su fe en mí me ha fortalecido y su amor inquebrantable ha sido mi inspiración. Este logro es tan suyo como mío, y espero que al leer estas palabras sientan cuánto valoro su presencia en mi vida. Gracias por ser los mejores padres que podría haber deseado.

Jeremy Escalante I

AGRADECIMIENTO

En primera instancia les agradezco a mis profesores que he tenido en el transcurso formación como ingeniero en la universidad politécnica salesiana. Debido a los conocimientos inculcados y fundados en mi pude hacer posible este proyecto.

Considero nombrar al Ing. Berrones, Ing. Luis Morán, Ing. Iván Suarez profesores con ejemplares conocimiento, gracias por formarnos como ejemplares profesionales, desarrollar nuestras ideas sacando nuestro máximo potencial proyectándonos como profesionales dueños de nuestras propia empresa o profesionales con un alto nivel de conocimiento, motivándonos a generar metas y sueños.

De manera especial agradezco a nuestra directora de carrera Ing. Fabiola Terán, siempre dispuesta en guiarnos y ayudarnos en todo lo que esté a su alcance para poder culminar nuestra fase como profesionales. Y por último agradezco a esta universidad como tal por permitir formarme con gloriosos conocimientos en la rama de producción, por permitir socializar con compañeros con grandes ideas y compañerismo. Ayudándonos siempre uno a otros para poder llegar como objetivo propuesta ser ingeniero industrial.

Josué Arizaga R

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, quienes han sido mi mayor apoyo a lo largo de este arduo camino. Vuestra confianza, amor incondicional y sacrificios han sido la fuerza impulsora detrás de mis logros. Sin ustedes, nada de esto sería posible.

También quiero agradecer a mis profesores y mentores, quienes me brindaron orientación, conocimientos y valiosos consejos a lo largo de mi investigación. Vuestra dedicación y pasión por la enseñanza han sido una inspiración constante en mi desarrollo académico. Agradezco también a mis amigos y compañeros de estudio, quienes compartieron conmigo momentos de estudio, desafíos y alegrías. Vuestro apoyo mutuo y colaboración fueron fundamentales para superar obstáculos y alcanzar nuestras metas. No puedo olvidar mencionar a todas las fuentes y bibliotecas que me proporcionó la Universidad Politécnica Salesiana para el acceso a la información necesaria para llevar a cabo mi investigación de manera exhaustiva y precisa.

Por último, agradezco a todos aquellos que de alguna manera me alentaron, brindaron palabras de estímulo y creyeron en mi capacidad para culminar este proyecto. A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento. Vuestra contribución ha sido invaluable en mi camino hacia la graduación universitaria y el logro de mi proyecto de tesis.

Jeremy Escalante I

RESUMEN

El documento propone la implementación de un prototipo para obtener combustible a partir de plásticos PET reciclables, con el objetivo de reducir el consumo masivo de plástico y reutilizarlo en la fabricación de combustible, un recurso ampliamente utilizado a nivel global. El proyecto se enfoca en socializar y comercializar este combustible a nivel nacional, beneficiando a agricultores y personas con recursos limitados que necesitan un combustible más asequible para sus vehículos en Ecuador.

El proceso se basa en la pirólisis, que implica calentar el plástico PET a más de 100°C para convertirlo en gas, generando hidrocarburos y agua. Luego, se separa el agua de los hidrocarburos mediante intercambio de calor y se destila para obtener el combustible deseado.

Se destaca que el plástico, debido a su estructura y composición química, tiene una vida útil corta y no es biodegradable. Esto ha llevado a una acumulación masiva de residuos plásticos, lo que genera problemas ambientales, sociales y de salud pública.

La contaminación plástica es un problema global, ya que el plástico puede tardar más de 100 años en degradarse, y los ecuatorianos producen grandes cantidades de desechos plásticos diariamente. Para abordar esta problemática, se propone la descomposición de los plásticos mediante pirólisis a alta temperatura, lo que reduce la contaminación y permite reutilizar materiales plásticos no biodegradables como combustible.

El tipo de plástico PET utilizado se selecciona según su densidad para obtener una mayor proporción de gas, sólidos y líquidos. Se señala la importancia de separar el hidrocarburo del agua

generada durante la descomposición del PET mediante intercambio de calor. La eficiencia del proceso de pirólisis depende de factores como la temperatura, la presión de trabajo y otros parámetros operativos.

Palabras claves: Tereftalato, déficit, elaboración.

ABSTRACT

The document proposes the implementation of a prototype to obtain fuel from recyclable PET plastics, with the aim of reducing the massive consumption of plastic and reusing it in the manufacture of fuel, a resource widely used globally. The project focuses on socializing and marketing this fuel at the national level, benefiting farmers and people with limited resources who need more affordable fuel for their vehicles in Ecuador.

The process is based on pyrolysis, which involves heating PET plastic to over 100°C to turn it into a gas, generating hydrocarbons and water. The water is then separated from the hydrocarbons by heat exchange and distilled to obtain the desired fuel.

It is highlighted that plastic, due to its structure and chemical composition, has a short useful life and is not biodegradable. This has led to a massive accumulation of plastic waste, creating environmental, social and public health problems.

Plastic pollution is a global problem, as plastic can take over 100 years to degrade, and Ecuadorians produce vast amounts of plastic waste daily. To address this problem, the decomposition of plastics through high-temperature pyrolysis is proposed, which reduces pollution and allows non-biodegradable plastic materials to be reused as fuel.

The type of PET plastic used is selected according to its density in order to obtain a higher proportion of gas, solids and liquids. The importance of separating the hydrocarbon from the water generated during the decomposition of PET by means of heat exchange is pointed out. The

efficiency of the pyrolysis process depends on factors such as temperature, working pressure and other operating parameters.

Keywords: Terephthalate, deficit, elaboration.

INDICE GENERAL

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA	i
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACION.....	ii
CERTIFICADO DE CESION DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACION A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.....	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
AGRADECIMIENTO.....	vii
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT	x
INDICE DE ILUSTRACIONES.....	xv
INDICE DE TABLAS.....	xvi
INDICE DE GRAFICOS	xvi
INDICE DE ANEXOS	xvi
TITULO.....	xvii
GLOSARIO DE TERMINOS	xvii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I.....	5
EL PROBLEMA	5
1.1 ANTECEDENTES	5
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	7
1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	8
1.4 GRUPO OBJETIVO BENEFICIARIO	8
1.5 OBJETIVOS	9
1.5.1 OBJETIVO GENERAL	9
1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
CAPITULO II.....	10
MARCO TEÓRICO	10
2.1 EL PLÁSTICO	10

2.2	ORIGEN DEL PROBLEMA DE LOS PLÁSTICOS.....	10
2.3	TIPOS DE PLÁSTICOS.....	11
2.4	GESTIÓN DE LOS RESIDUOS PLÁSTICOS	13
2.5	IDENTIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS PLÁSTICOS	14
2.6	TEREFTALATO DE POLIETILENO	18
2.6.1	DEFINICIÓN	18
2.6.2	TIPOS DE PET	18
2.6.3	IDENTIFICACIÓN DEL PET	19
2.6.4	PROPIEDADES DEL PET	20
2.6.5	APLICACIONES DEL PET	21
2.6.6	DEGRADACIÓN DEL PET	22
2.6.7	IMPACTO DE BOTELLAS PET	23
2.7	PIRÓLISIS	23
2.8	REACTOR DE PIRÓLISIS	24
2.9	REACCIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LOS PLÁSTICOS	25
2.10	INTERCAMBIADOR DE CALOR	25
	CAPITULO III	26
	METODOLOGIA	26
3.1	VERIFICACION Y CLASIFICACION DE RESIDUOS PET	26
3.2	PRE – TRATEMIENTO DE LOS RESIDUOS PLASTICOS	27
3.3	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	29
3.4	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PIROLISIS – INICIO	32
3.5	PROCESO PIROLISIS	36
3.6	ANALISIS DE LAS PROPIEDADES FISICAS DEL PROCESO PIROLISIS	39
3.6.1	COLOR Y OLOR.....	40
3.6.2	DENSIDAD	41
3.6.3	VISCOCIDAD	44
3.6.3	PUNTO DE INFLAMACIÓN	45
	CAPITULO IV	47
	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	47
4.1	CLASIFICACION DE RESIDUOS PLASTICOS	47

4.2. PROCESO DE PIROLISIS A TEMPERATURAS MENORES DE 300°C.....	48
4.3. MUESTRAS DE ENSAYO OBTENIDAS DEL PROCESO PIROLISIS	49
4.4. IGNICION DE MUESTRAS LIQUIDAS Y GASEOSA	51
CAPITULO V	53
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	53
5.1 CONCLUSIONES.....	53
5.2 RECOMENDACIONES	54
BIBLIOGRAFÍA.....	56
ANEXOS.....	61

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Gráfico de PET	20
Ilustración 2 Clasificación de los materiales plásticos (PET).....	26
Ilustración 3 Separación del material requerido (PET).....	27
Ilustración 4 Retiro de los adhesivos	28
Ilustración 5 Envases Limpios	28
Ilustración 6 PET Comprimido	29
Ilustración 7 Reactor de Pirolisis	30
Ilustración 8 Intercambiador de calor	31
Ilustración 9 Recirculación del agua.....	31
Ilustración 10 Encapsulado de la MP dentro del reactor	32
Ilustración 11 Sellado de la escotilla	32
Ilustración 12 Reactor cargado y sellado	33
Ilustración 13 Encendido de los quemadores.....	34
Ilustración 14 Enfriamiento de los gases	35
Ilustración 15 Recirculación del agua fría	35
Ilustración 16 Obtención de hidrocarburo	36
Ilustración 17 Producto Obtenido del proceso pirolisis.....	37
Ilustración 18 Muestra de producto obtenido	38
Ilustración 19 Producto liquido PET	39
Ilustración 20 Residuos del proceso de degradación del plástico.....	40
Ilustración 21 Color del hidrocarburo obtenido.....	40
Ilustración 22 Factores de corrección (b)	43
Ilustración 23 Punto de inflación	46
Ilustración 24 Temperatura de inicio de salida de los gases.....	50
Ilustración 25 Ignición de los gases	51
Ilustración 26 Pruebas de Ignición.....	52

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de termoplásticos según la SPI.....	12
Tabla 2 Codificación global de los termoplásticos según la Sociedad de la Industria de Plásticos	14
Tabla 3 Densidad de los plásticos	43
Tabla 4 Densidad del coque.....	44
Tabla 5 Material de entrada y salida del proceso	48
Tabla 6 Tabla de rendimientos del proceso	48

INDICE DE GRAFICOS

Gráfico 1: Clasificación de los gráficos encontrados	47
Gráfico 2: Rendimiento del proceso.....	49
Gráfico 3: Temperaturas de los ensayos.....	50

INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Diagrama de flujo del proceso pirólisis.....	61
ANEXO 2: Equipo para el proceso peirolisis	62
ANEXO 3 Costos aproximados	63

TITULO

Propuesta de elaboración de combustible por pirólisis a base de botellas desechadas de tereftalato de polietileno

GLOSARIO DE TERMINOS

Atributos: El atributo es una palabra o un sintagma que cumple la función sintáctica de complemento de verbo y que enuncia cualidades, características, propiedades o estados del sujeto (Blasco, 2023).

Celsius: La unidad de temperatura es el grado Celsius (símbolo °C), que es, por definición, igual en magnitud al Kelvin (Laurila, 2019).

Optimización: Buscar la mejor manera de realizar una actividad (Pérez Porto, 2009).

Petróleo: Líquido natural oleaginoso e inflamable, constituido por una mezcla de hidrocarburos, que se extrae de lechos geológicos continentales o marítimos y del que se obtienen productos utilizables con fines energéticos o industriales, como la gasolina, el queroseno o el gasóleo (Real Academia Española, 2022).

PET: El Polietileno Tereftalato, también conocido por su sigla PET, es un tipo de plástico comúnmente utilizado en envases y botellas de gaseosa, agua y aceite, entre otros. Además de ser 100% reciclable, sus aplicaciones varían desde la fabricación de más envases hasta la producción de abrigos de polar (Buenos Aires, 2017).

Pirólisis: Es un proceso de conversión termoquímica que convierte la biomasa en combustibles útiles mediante calentamiento a temperaturas moderadamente altas y en ausencia de oxígeno (Urien Pinedo, 2013).

Plástico: Los plásticos son materiales compuestos por resinas, proteínas y otras sustancias, son fáciles de moldear y pueden modificar su forma de manera permanente a partir de una cierta compresión y temperatura (Editorial RSyS, 2021).

Polietileno: El polietileno (PE) es químicamente el polímero más simple. Se representa con su unidad repetitiva $(CH_2-CH_2)_n$. Es uno de los plásticos más comunes debido a su bajo precio y simplicidad en su fabricación, lo que genera una producción de aproximadamente 80 millones de toneladas anuales en todo el mundo (Re-ciclo, 2013).

Polímeros: Los polímeros se pueden usar para reforzar, aislar, espesar, licuar y mucho más. Los usos potenciales para los polímeros parecen ser infinitos y este también es el caso dentro de la Industria de la Construcción (Gres, 2017).

Temperatura: La temperatura es una magnitud física que indica la energía interna de un cuerpo, o de un sistema termodinámico en general. Esta propiedad termodinámica únicamente describe un estado macroscópico (Planas, 2016).

INTRODUCCIÓN

Mediante este presente documento se presentará la implementación de este prototipo la obtención de combustible a base de plásticos PET (Polietileno tereftalato) %100 reciclables, como primer objetivo poder obtener hidrocarburos a base de la MP mencionado.

Esto permitiendo reducción de consumo masivo plástico reutilizando para la fabricación el líquido más utilizado a nivel mundial el COMBUSTIBLE. Como fin de socializar y comercializar a nivel nacional le producto de primera instancia al agricultor o personal de bajo déficit financiero y que requiera utilizar un combustible a menor precio que le permitirá movilizarse en su vehículo a diferentes partes del ecuador.

Este proceso se obtendrá por medio de la pirolisis donde el plástico alcanzará una cierta temperatura a más 100°C que permitirá deshacer MP llevándolo a su estado gaseoso donde obtendremos hidrocarburos y H₂O.

Luego se pasarlo por un intercambiado de calor para separar el agua de los hidrocarburos por su densidad, se procederá a destilar para obtener el combustible requerido, al finalizar el proceso se encenderá para ver la ignición del líquido obtenido.

Luego se los pondrá a prueba en un motor de 2 tiempos para verificar su comportamiento. Posterior a esto se enviará las muestras a un laboratorio para medir el nivel de octanaje del producto para a si constatar el nivel de calidad que se obtuvo. Presto a esto analizará si se podrá comercializar dependiendo de la MP ingresada con respecto al producto final obtenido para así valorizar si es rentable elaborarlo.

A nivel mundial existen otras causas, dependiendo la densidad del plástico, la resistencia del mismo dependiendo su composición química, propiedades que les confieren diferentes industrias. El plástico debido a su estructura y componente químico tiene una vida

útil relativamente corta, no son biodegradables, por lo que su alta demanda en la vida de los seres humanos tiene variedad de utilidad desde uso doméstico hasta uso industrial. Tales como vasos, platos, cucharas, sillas entre otras variedades a nivel doméstico. A nivel industrial tiene diferente uso sillas, rascadores de plásticos, palas, gavetas etc.

Por la gran cantidad de consumo de producto con que llevan plásticos nos conlleva a generar una gran acumulación de residuos sólidos de material plástico. Eso no ocasionado un gran problema ambiental, sociales y de salud pública en lugar donde se acopian tales desechos no degradables.

La contaminación por el plástico es una problemática mundial que afecta a todos, este material tarda de más 100 años en descomponerse. La degradación del plástico es un proceso lento y con consecuencia al medio ambiente y nuestra propia salud, los ecuatorianos arrojaron 561.28 toneladas de basura diarias corresponde al 6.51% de los residuos sólidos producidos (plástico suave), mientras que el plástico rígido es de 4.45% que corresponde a 821.11 toneladas diarias.

Para combatir esta contaminación mundial se ha reutilizado ciertas categorías de plásticos una que otras no se la reutilizan, pero la mayor parte si, por ende, se plantea la descomposición del plástico mediante un proceso de alta temperatura (pirólisis) por lo que permitirá reducir el porcentaje de contaminación masivo que existe y permitirá reutilizar materiales que ya no tiene vida útil, a altas temperaturas nos permitirá volverlo combustible uno de los liquido más utilizado en mundo.

Al fundir un plástico se deberá tener presente la densidad del plástico dependiendo su categoría eso ya está establecido tale como PET, PVC, PP, PS entre otros. Dependiendo su densidad se evidenciará el consumo de plástico al momento de fundirlo, se constatará que el plástico que tenga menor densidad el consumo será más rápido al momento de derretirlo en el

reactor, mientras que el plástico con mayor densidad del plástico tendrá mayor tiempo en reactor.

En este caso se planteamos reutilizar el plástico PET con menor densidad para poder obtener gas, sólido y líquido esto para verificar si obtendremos lo mencionado a mayor proporción.

Pero se tiene presente que al descomponer un PET no solo tendrá derivador de petróleo si no también H₂O, por ende, se deberá separar el hidrocarburo con el agua. Se explicará como se podrá realizar este proceso con intercambio de calor para poder separar estos componentes y no tener inconvenientes al tener un producto final.

El proceso pirolisis a temperatura menos de 300 °C presenta una inconsistencia por lo que se incremente la mayor cantidad de coque a otros fines, de cual la producción se hará más lenta. A temperaturas entre 300°C y 900°C la producción fluctúa con mayor eficiencia por que se alcanzara a los objetivos deseados.

Esto dependerá también de las condiciones que de la operación del proceso (tales como la presión de trabajo, los flujos de gas, la carga de MP, la velocidad de calentamiento, el tiempo de exposición del material, el sistema de enfriamiento para el condensado del gas, etc.).

En obtención se visualizará mezclas de producto sólidos, líquido y /o gaseosos en diferentes porciones y con diferente composición. Para poder obtener lo mencionado esto dependerá del sistema del enfriamiento. El proceso como tal tiene la dosificación, alimentación de la materia prima, la transformación de masa orgánica, la separación de la masa en (coque, gas, líquido).

En la pirólisis flash también conocida como pirolisis rápida por su alta temperatura de en el proceso, no obstante, es muy importante la transferencia de calor y de más, Tales como

fenómenos de cambio de fase. En primera instancia lo que sale es gas volátil. Des pues del enfriamiento del gas comienza a salir liquido condensado de dicho gas al finalizar proceso el reactor tendrá una gran cantidad de coque.

CAPITULO I

EL PROBLEMA

1.1 ANTECEDENTES

Las botellas de tereftalato de polietileno (PET) han sido una elección popular para envasar bebidas y otros productos debido a su ligereza, resistencia y transparencia. Sin embargo, la producción y el uso masivo de estas botellas han generado una preocupación creciente debido a su impacto ambiental negativo del 85%, especialmente en términos de contaminación. Se estima que cada año, entre 4.8 y 12.7 millones de toneladas de plástico ingresan a los océanos, lo que representa una gran amenaza para la vida marina y el ecosistema (Morán, 2022).

Según la INEC, en el 2020 el país recolectó un promedio de 12.613 toneladas de residuos sólidos al día. De estas toneladas, el 44 % se dividen en desechos inorgánicos y el 11 % corresponde a desechos plásticos, entre ellos plásticos rígidos y suaves (Morán, 2022).

Los antecedentes de la contaminación de las botellas de PET en el medio ambiente se remontan a la década de 1970, cuando se introdujo este material en el mercado. La producción de PET implica el uso de petróleo crudo como materia prima, un recurso no renovable que ha llevado a una explotación intensiva de los yacimientos petrolíferos. La extracción de petróleo y su procesamiento para obtener el monómero de tereftalato de etileno generan emisiones de gases de efecto invernadero y contribuyen al cambio climático.

Una vez producidas las botellas de PET, el problema principal reside en su eliminación inadecuada. Aunque el PET es reciclable, muchas de estas botellas terminan en vertederos o son arrojadas al medio ambiente de forma irresponsable. El PET es un material resistente y puede persistir durante décadas en el entorno natural sin descomponerse. Esto ha llevado a la

acumulación de botellas de PET en océanos, ríos, playas y otros ecosistemas, generando una grave contaminación.

Cuando las botellas de PET se descomponen por acción de la luz solar y otros factores, liberan pequeñas partículas de plástico conocidas como micro plásticos. Estos micro plásticos son altamente persistentes y pueden ser ingeridos por la vida marina, incluyendo peces, aves y mamíferos marinos. A medida que los micro plásticos se mueven a través de la cadena alimentaria, se bioacumulan y pueden llegar a los seres humanos a través del consumo de productos marinos contaminados.

Además de los impactos en la vida marina, las botellas de PET también afectan los ecosistemas terrestres. Cuando se arrojan al suelo o se acumulan en áreas naturales, pueden contaminar el suelo y los cursos de agua cercanos. La degradación de las botellas de PET también puede liberar aditivos químicos tóxicos utilizados en su fabricación, lo que aumenta el riesgo de contaminación del agua y el suelo.

Para abordar estos problemas, se han implementado diversas medidas. En primer lugar, se ha promovido el reciclaje de las botellas de PET como una forma de reducir la cantidad de desechos plásticos que terminan en el medio ambiente. Sin embargo, el reciclaje efectivo de las botellas de PET es un desafío debido a la falta de infraestructura adecuada, la falta de conciencia sobre la importancia del reciclaje y la contaminación cruzada con otros tipos de plástico.

Además del reciclaje, también se están buscando alternativas más sostenibles al PET. Se están desarrollando nuevos materiales biodegradables y compostables que podrían reemplazar el PET en aplicaciones de envasado. Estos materiales, como el ácido poliláctico (PLA) derivado.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La contaminación plástica es un problema ya conocido por todos, pero es sorprendente como cada día llegan a nuestros oídos más noticias de lo grave que se está volviendo la cuestión de los plásticos. Esta problemática se ha convertido en uno de los retos medioambientales más acuciantes de nuestro tiempo. La producción e incineración de plásticos contribuye en gran medida al cambio climático.

Los residuos plásticos también ahogan nuestras vías fluviales, contaminan nuestros océanos, matan la vida silvestre y se infiltran en nuestra cadena alimentaria. El plástico puede contaminar el medio ambiente de muchas maneras diferentes. En primer lugar, los residuos plásticos generados por la sociedad pueden ser reciclados, depositados en vertederos, incinerados o vertidos directamente al medio ambiente.

En Ecuador se produce más de 13.000 toneladas diarias de basura plástica, sin embargo, entre el 30 y 50 % llega mezclada con otros materiales que dificultan el reciclaje y un 94%, aproximadamente un 80% de consumo de plásticos PET se entierra sin ningún tipo de tratamiento.

Mientras la tendencia mundial apunta hacia la eliminación de los plásticos de uno solo uso, Ecuador camina en contrasentido, siendo el tercer país de la región que más basura importa. Entre 2018 y 2021, el país importó 47.596 toneladas de desechos plásticos, por un monto que bordea los USD 19 millones, según un estudio publicado en marzo de 2022 por la Alianza Basura Cero Ecuador y la Universidad Andina Simón Bolívar Ecuador (Machado, 2022)

En la costa, el plástico es una amenaza para nuestra vida marina, convirtiéndose en un peligro para la salud pública e impactando negativamente en la economía nacional, en la que el turismo es una de las industrias más afectadas. La escala del problema es global: según las

Naciones Unidas, del 60 al 90 % de la basura que se encuentra en las costas, las superficies marinas y los fondos oceánicos consiste en plástico. Se espera que estas cifras se dupliquen para 2030 (Organización de las Naciones Unidas, 2021).

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El presente trabajo se realizó con la debida investigación ardua, sobre la descomposición del plástico, como objetivo general para obtener combustible. Debido a que los PET son productos fabricados con derivados del petróleo. Para obtener la sustancia volátil se realizará unos estudios y análisis del proceso pirólisis en una degradación térmica de una sustancia en ausencia de oxígeno, por lo que dichas sustancias se descomponen mediante calor, sin que se produzcan las reacciones de combustión. Las características básicas de dicho proceso son las siguientes.

Los residuos líquidos y gaseosos pueden aprovecharse mediante combustión a través de un ciclo de vapor para la producción de energía eléctrica. El residuo sólido puede utilizarse como combustible en instalaciones industriales. También nos permitirá distribuir a bajo costo a la población agrícola para uso fundamental en bombas de aguas, vehículos, generadores entre otros.

1.4 GRUPO OBJETIVO BENEFICIARIO

Se realizó este ensayo con la finalidad de presentar la investigación de descomposición química de los PET en la ciudad de Guayaquil, con el fin de conocer a profundidad bajo a que circunstancias este produce mejor resultado, se verificará a cabalidad que los requisitos y estipulaciones previstas se cumplan.

La obtención de combustible es sin lugar a duda algo innovador donde contribuirá a mucha gente de zona agrícola en diferentes provincias tales con (los ríos, azogues, Chimborazo, Tungurahua). Debido a que más del 64 % de la producción agrícola nacional le pertenece a los pequeños productores y la mayoría de los alimentos consumidos en el Ecuador provienen de la Agricultura Familiar Campesina (AFC).

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 OBJETIVO GENERAL

Implementar la obtención de combustible a partir de botellas de plástico PET en Ecuador para reducir la contaminación, promover la sostenibilidad y disminuir el impacto ambiental negativo.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar y construir un prototipo piloto para la producción de combustible por pirólisis a escala reducida.
- Validar la viabilidad técnica y económica del proceso de pirólisis a través de pruebas en el prototipo.
- Identificar los productos generados por el proceso de pirólisis de las botellas desechadas PET.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 EL PLÁSTICO

Los plásticos son materiales sintéticos obtenidos mediante reacciones de polimerización a partir de derivados de petróleo. Son materiales orgánicos, igual que la madera, el papel o la lana. Las materias primas que se utilizan para producir plástico son productos naturales como el carbón, el gas natural, la celulosa, la sal y, por supuesto, el petróleo (Cairplas, 2018).

Los plásticos han hecho un gran aporte para solucionar muchas necesidades de la sociedad, pero el crecimiento de las ciudades y la cantidad de habitantes ha aumentado notablemente la cantidad de residuos generados y la demanda de materias primas. Una de las soluciones es aumentar considerablemente la incorporación de material reciclado en los productos finales y minimizar los residuos industriales y domiciliarios (Cairplas, 2018).

2.2 ORIGEN DEL PROBLEMA DE LOS PLÁSTICOS

Los plásticos han hecho un gran aporte para solucionar muchas necesidades de la sociedad, pero el crecimiento de las ciudades y la cantidad de habitantes ha aumentado notablemente la cantidad de residuos generados y la demanda de materias primas (Luna Rodríguez, 2019).

Para su producción se utiliza principalmente derivados del petróleo, así como aditivos, antioxidantes, colorantes y otros estabilizantes para mejorar su resistencia al medio ambiente. Sin embargo, algunos procesos naturales, como la foto degradación, hacen que el plástico se descomponga en pequeñas partículas que contaminan no solo el agua, el suelo y el aire; pero

pueden entrar en la cadena alimenticia, causando problemas de salud en animales e incluso humanos (Luna Rodríguez, 2019).

A veces, el plástico también se quema, creando y liberando gases de efecto invernadero y contaminantes como los hidrocarburos poliaromáticos (PAH), CO_x, NO_x, SO_x e incluso carcinógenos como las dioxinas y el furano (Luna Rodríguez, 2019).

2.3 TIPOS DE PLÁSTICOS

Los plásticos se clasifican de diferentes maneras según su origen (natural o sintético), reacción de síntesis (aditiva o condensación), estructura molecular (amorfo, semicristalino, cristales), entre otras cosas para aplicaciones de ingeniería. Se clasifican más comúnmente en función de su comportamiento frente al calor, dividiéndolos en termoestables o termoplásticos (Luna Rodríguez, 2019).

2.3.1 TERMOPLÁSTICOS

Estos son plásticos que, cuando se calientan adecuadamente, se pueden derretir y volver a moldear en nuevas formas, este proceso de calentamiento y remodelado se puede utilizar una y otra vez hasta que pierda por completo sus propiedades. Esto lo hace reutilizable y reciclable. Se incluyen en este rubro: polietileno, poliestireno, policloruro de vinilo, polipropileno y otros.

La termoplasticidad se debe a la falta de enlaces covalentes entre las cadenas de polímeros, que siguen siendo en su mayoría unidades independientes que se mantienen unidas por fuerzas electrostáticas débiles (Luna Rodríguez, 2019).

2.3.2 TERMOFIJOS

También conocidos como termosets o termoestables, estos son de plástico que a temperatura ambiente se presentan con una consistencia dura y rígida, y pueden suavizarse y

solo derretirse una vez, por lo que después de la forma final, todavía son sólidos para siempre y no pueden volver a suavizarse. Esto no los hace adecuados para la purificación de calor repetitiva, sus desechos no se tratan y no se pueden usar para obtener otros productos.

Estos plásticos se utilizan ampliamente en productos electrónicos y de automoción. Algunos ejemplos de plásticos de este grupo son: fenol formaldehído, urea formaldehído, melamina formaldehído, poliuretano, resina epoxi, etc. Los termoestables son materiales con cadenas poliméricas unidas químicamente por fuertes enlaces covalentes, lo que da como resultado una estructura reticular tridimensional (Luna Rodríguez, 2019).

Tabla 1

Clasificación de termoplásticos según la SPI

Número	Abreviatura	Nombre completo
1	PET (en inglés PETE)	Poliétilenotereftalato
2	PE-AD (en inglés HDPE)	Poliétileno de alta densidad
3	V, PVC	Vinili, Policloruro de vinilo
4	PE-BD (en inglés LDPE)	Poliétileno 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). Biopolímeros

La base del código es un símbolo de forma triangular, integrado por flechas (símbolo de reciclaje), con un número específico en el centro que establece el tipo de plástico. En la mayoría de los envases plásticos el código está marcado en su parte inferior, aplicado por moldeo o impreso por algún otro método.

Nota. Fuente: INEN, Disposición de desechos plásticos post-consumo, 2012.

2.4 GESTIÓN DE LOS RESIDUOS PLÁSTICOS

La gestión de residuos plásticos se considera un conjunto de procedimientos y políticas incorporados en una gestión ambiental económicamente viable donde se pueden enumerar los siguientes procesos y operaciones, que son: generación, recolección, almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final (Hidalgo Loaiza, 2012).

Existen opciones similares para reciclar residuos plásticos, una de estas es basada en el principio de las tres "erres", que son: reducir, reutilizar y recuperar, aunque con algunas características específicas que pueden deberse a la naturaleza propia de estos materiales (Aracil Sáez, 2008).

Reducción en origen, es el primer paso hacia una gestión adecuada de los residuos, incluye una variedad de acciones para reducir el uso de plásticos en la fabricación de productos manteniendo su calidad y eficacia en la prestación del servicio, esto significa reducir las emisiones de residuos (Aracil Sáez, 2008).

Reutilización, después de generar residuos, el siguiente paso es el reciclaje, permitiendo que los residuos sean utilizados en nuevas actividades o productos, aumentando la vida útil del material y reduciendo así el consumo de materias primas; por sus diversas propiedades, tales como: durables, lavables, resistencia, esterilización, etc.; los residuos plásticos son un material especialmente adecuado para su reutilización (Aracil Sáez, 2008).

Recuperación, se refiere a aquellos residuos que, aunque debidamente reducidos y reutilizados, aún se generan; sin embargo, también se pueden aprovechar a través del reciclaje mecánico, el reciclaje químico y la recuperación energética, que son tres alternativas existentes a los residuos plásticos (Aracil Sáez, 2008).


2.5 IDENTIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS PLÁSTICOS

En Ecuador, se utiliza el sistema de codificación de la Sociedad de la Industria de Plásticos (SPI) para categorizar los plásticos. Este sistema se basa en el tipo de resina con la que los plásticos han sido fabricados. La NTE INEN 2634:2012 proporciona una tabla que detalla los diversos usos de los plásticos post-consumo y su clasificación (Servicio Ecuatoriano de Normalización, 2012, julio). A través de este enfoque, se identifican siete tipos de plásticos, todos ellos considerados como parte de los termoplásticos mencionados previamente.

La clasificación internacional establecida por la Sociedad de la Industria de Plásticos (SPI) facilita la distinción sencilla de los desechos plásticos, dado que se asigna un código exclusivo a cada tipo de plástico según sus atributos particulares. A continuación, en la tabla 2, se encuentra la explicación proporcionada por la norma INEN para cada una de estas categorías:

Tabla 2

Codificación global de los termoplásticos según la Sociedad de la Industria de Plásticos

Código de resina	Descripción	Aplicaciones del producto
	<p><i>Polietilentereftalato (PET, PETE)</i></p> <p>PET es claro, duro y tiene buenas propiedades de barrera de gas y humedad. Esta resina se utiliza comúnmente en botellas de bebidas y muchos contenedores de productos de consumo elaborados por moldeo por inyección. Copos/hojuelas y «pellets» limpios de PET reciclado tienen gran demanda para el hilado de fibra para alfombra, producción de fibra de relleno y geotextiles. Conocido como poliéster.</p>	<p>Botellas plásticas para bebidas ligeras, agua, jugo, bebidas deportivas, cerveza.</p> <p>Enjuague bucal, salsa de tomate y aderezo. Frascos de comida, para aceite de cocina, mantequilla de maní, jalea, mermelada y encurtidos.</p> <p>Películas para hornos, bandejas</p>



Polietileno de Alta Densidad

Es utilizado para elaborar diversos tipos de envases. Los envases no pigmentados son traslúcidos, tienen buenas propiedades de barrera y rigidez y son adecuados para envasado de productos con una corta vida de estante como la leche. Debido a que el HDPE tiene buena resistencia química, se usa para el envasado de muchos productos químicos domésticos e industriales tales como detergentes y lejía. Las botellas pigmentadas de HDPE tienen mejor resistencia al estrés por agrietamiento que aquellas de HDPE no pigmentado.



Cloruro de Polivinilo

Además de sus propiedades físicas estables, el PVC tiene buena resistencia química, resistencia a la intemperie, características de flujo y propiedades eléctricas estables. La diversa lista de productos de vinilo puede dividirse ampliamente en materiales rígidos y flexibles.



Polietileno de Baja Densidad

LDPE se utiliza principalmente en aplicaciones de película debido a su dureza,

de comida para microondas.

Envases para lácteos, agua, jugo, cosméticos, champú, detergente para platos y lavandería y limpiadores domésticos. Bolsas para alimentos y compras al por menor. Fundas de cajas de cereales. Contenedores reutilizables.

Aplicaciones de embalaje rígido incluyen ampollas y recipientes con bisagras para comida para llevar. El uso en envases flexibles incluye bolsas para ropa de cama y ropa médica, delicatesen y presentan utilidad para embalajes y resistencia a la manipulación. Bolsas y envolturas transparentes o pigmentadas. Bolsas para limpieza en seco, periódicos, pan,

flexibilidad y relativa transparencia, y es de uso común en aplicaciones donde es necesario el sellado mediante calor. El LDPE también se utiliza para fabricar algunas tapas flexibles y botellas, así como en aplicaciones sobre alambres y cables. Incluye al Polietileno Lineal de Baja Densidad (LLDPE).



Polipropileno

El PP tiene buena resistencia química, es fuerte y tiene un elevado punto de fusión por lo que le da aptitud para ser llenado con líquidos en caliente. Esta resina se encuentra en embalajes flexibles y rígidos, fibras y grandes piezas moldeadas para automóviles y productos de consumo.



Poliestireno

PS es un plástico versátil que puede ser rígido o espumoso. El poliestireno de uso general es claro, duro y quebradizo. Tiene un punto de fusión relativamente bajo. Las aplicaciones típicas incluyen el embalaje de protección, envases de alimentos, botellas.

alimentos congelados, productos frescos y basura doméstica. Termoencogibles y película de estiramiento (stretch film). Recubrimientos para cartones de leche y vasos de bebidas calientes y frías. Tapas de contenedores. Juguetes. Contenedores para yogur, margarina, comidas para llevar y alimentos gourmet. Botellas de medicamentos y cosméticos. Tapas de botellas y cierres. Sorbetes Botellas de salsa de tomate y jarabe. Artículos para servicios de alimentos, tales como tazas, platos, cuencos, cubiertos, recipientes con bisagras para comida para llevar, bandejas de carne y aves de corral, envases rígidos para alimentos (por ejemplo, yogur). Estos artículos pueden ser elaborados con PS en forma



Otros

El uso de este código indica que un paquete/envase/embalaje está elaborado con una resina, distinta a las seis anteriormente enlistadas o está compuesta por más de una resina y se utiliza en una combinación de múltiples capas. Incluye al poliuretano (PU), acrilonitrilobutadienoestireno (ABS), policarbonato (PC), resina acetal.

espumosa o no espumosa.
Espuma de embalaje de protección para muebles, aparatos electrónicos y otros objetos delicados.

Botellas de agua reutilizables de tres y cinco galones, algunas botellas de jugos cítricos y salsa de tomate.

Bolsas de cocción al horno, capas de barrera y el embalaje a medida. Piezas de grifería y de vehículos.

Discos compactos, techo traslúcido, armazones. El PU se emplea principalmente como aislante de temperatura. El ABS es un plástico duro empleado en perfiles, tuberías, defensas de automóviles y juguetes. Los discos compactos y garrafones de agua están hechos de PC.

2.6 TEREFTALATO DE POLIETILENO

2.6.1 DEFINICIÓN

El tereftalato de polietileno (PET) es un polímero termoplástico ampliamente utilizado en diversos sectores de Ecuador. Se obtiene a partir de la reacción química del ácido tereftálico con el etilenglicol, lo que resulta en un material resistente, transparente y altamente reciclable. En Ecuador, el PET se ha consolidado como un material clave en la fabricación de envases y botellas debido a su capacidad para retener líquidos y gases, lo que lo hace ideal para el envasado de alimentos, bebidas y productos farmacéuticos.

Además de su aplicación en el envasado, el PET ha sido objeto de investigaciones para explorar su uso en otros sectores, como la construcción, la industria textil y la fabricación de productos de consumo. Estas investigaciones buscan aprovechar las propiedades del PET, tales como su resistencia, ligereza y transparencia, para diversificar su aplicación y promover la sostenibilidad en el manejo de los residuos plásticos en Ecuador. (Trade, 2023).

2.6.2 TIPOS DE PET

Según Novatec, el tereftalato de polietileno (PET) es un tipo de plástico que se clasifica dentro de la categoría de los poliésteres. Sin embargo, en términos de reciclaje y gestión de residuos, el PET también se clasifica en función de su uso y características. A continuación, se detallan las principales clasificaciones del PET:

- PET virgen: Se refiere al PET producido a partir de materias primas nuevas, sin ningún contenido reciclado. Es comúnmente utilizado en la fabricación de envases para alimentos y bebidas debido a su pureza y calidad.

- PET reciclado: Se obtiene a partir del reciclaje de botellas y envases de PET posconsumo. Puede ser utilizado para fabricar nuevos envases, fibras textiles, alfombras, láminas y otros productos.
- PET cristalizado: También conocido como PETG (tereftalato de polietileno glicol), se trata de una variante del PET que se caracteriza por su mayor transparencia y resistencia al impacto. Es utilizado en aplicaciones que requieren alta claridad, como envases de cosméticos y exhibidores.
- PET amorfo: Es una forma del PET que no presenta una estructura cristalina definida, lo que le otorga propiedades de mayor flexibilidad y resistencia a la deformación. Se emplea en aplicaciones como películas de envasado y láminas termoformadas.

Estas clasificaciones del PET son importantes para facilitar su identificación y selección adecuada en los procesos de reciclaje, fabricación y utilización en distintas industrias. (Haynie, 2023)

2.6.3 IDENTIFICACIÓN DEL PET

Identificar las botellas de PET es fácil, solo busca el símbolo que las clasifica, un triángulo de Möbius con tres flechas que representan las tres etapas del proceso de reciclaje y el número 1 en el medio. Siempre que encontremos este símbolo en el envase, podemos estar seguros de que está hecho de plástico reciclable, más precisamente de botellas PET. (Alcion, 2021)

Ilustración 1

Gráfico de PET



Nota. Tomado de (123RF, 2023).

2.6.4 PROPIEDADES DEL PET

Una de las características del tereftalato de polietileno (PET) es que tiene una alta estabilidad y pureza debido a sus propiedades químicas. Este plástico es el resultado de la condensación de dos químicos conocidos como etilenglicol y ácido tereftálico. Esto contribuye a las siguientes propiedades del PET:

- Máxima protección de los alimentos.
- Permite la degradación química.
- Resistente al desgaste.
- Transparente: no tiene nada que esconder.
- Resistente, pero reciclable.

Sin embargo, las propiedades del PET o RPET reciclado lo hacen incompatible con la industria alimentaria. Por este motivo, muchas empresas eligen el proceso de súper limpieza para descontaminar el material mediante un tratamiento térmico y así hacer que el material sea apto para el contacto con alimentos. (Envases del Mediterráneo, 2020)

2.6.5 APLICACIONES DEL PET

El tereftalato de polietileno (PET) es ampliamente utilizado en diversas aplicaciones debido a sus propiedades únicas. Algunas de las aplicaciones comunes del PET incluyen:

- Envases de alimentos y bebidas: Las botellas y envases de PET son una opción popular para el envasado de agua, refrescos, jugos, aceites, salsas, alimentos preparados y otros productos alimenticios. El PET es transparente, liviano, resistente y seguro para el contacto con alimentos.
- Textiles: El PET reciclado se utiliza para la fabricación de fibras textiles, como el poliéster. Se emplea en la producción de prendas de vestir, ropa deportiva, ropa de cama, alfombras y tapicería.
- Envases cosméticos: Los envases de PET son utilizados para productos de cuidado personal, como champús, acondicionadores, lociones, geles de ducha, cremas y productos de belleza.
- Envases farmacéuticos: El PET se utiliza en la fabricación de envases para productos farmacéuticos, como medicamentos líquidos, comprimidos, vitaminas y suplementos.
- Embalajes industriales: El PET se emplea en la fabricación de contenedores y embalajes industriales, como barriles, tambores, contenedores de almacenamiento y productos para el transporte seguro de líquidos y productos químicos.
- Aplicaciones de construcción: El PET se utiliza en productos de construcción, como láminas y paneles aislantes, ventanas, puertas, tuberías y materiales compuestos.

- Productos electrónicos: El PET se encuentra en componentes de dispositivos electrónicos, como paneles de pantalla, teclados, carcasas y cables.

Estas son solo algunas de las aplicaciones más comunes del PET, pero su versatilidad permite su uso en una amplia gama de productos en diferentes industrias.

2.6.6 DEGRADACIÓN DEL PET

Uno de los principales procesos de degradación es la hidrólisis, que ocurre cuando el PET se expone a agua y altas temperaturas. Esto puede ocurrir durante el reciclaje del PET, donde se somete a condiciones de calor y humedad. La hidrólisis provoca la ruptura de las cadenas del polímero, lo que resulta en una disminución de su peso molecular y sus propiedades mecánicas.

La exposición a la luz ultravioleta también puede causar la degradación del PET. La radiación UV del sol induce la formación de radicales libres en las cadenas del polímero, lo que lleva a la ruptura y la pérdida de resistencia del material. Por esta razón, los envases de PET que se utilizarán en exteriores suelen incorporar aditivos estabilizadores UV para prevenir la degradación.

Además, el PET puede degradarse cuando se expone a productos químicos agresivos, como disolventes fuertes o ácidos. Estas sustancias pueden reaccionar con el PET y romper sus cadenas, provocando cambios en sus propiedades físicas y químicas. Es importante tener en cuenta que la velocidad y la magnitud de la degradación del PET pueden variar según las condiciones ambientales y la composición específica del material. La degradación del PET no significa necesariamente su desaparición completa, sino más bien una alteración en sus propiedades y estructura. (Prieto M. A., 2021)

2.6.7 IMPACTO DE BOTELLAS PET

Las botellas de plásticos PET han tenido varios impactos ambientales significativos en los años más recientes. Entre las cuales se pueden destacar alguno de ellos como la contaminación de los océanos, las botellas de plásticos PET son una de las principales fuentes de contaminación. Se estima que cada año se vierten millones de toneladas de plástico en los océanos. Estos plásticos pueden dañar los ecosistemas marinos, afectar la vida marina y persistir durante décadas.

Con respecto a la vida silvestre, estos desechos del PET pueden representar una amenaza para los animales ya que pueden confundir los fragmentos de plásticos con alimentos e ingerirlos, causándoles asfixia, obstrucción intestinal y otros problemas de salud que incluso puedan provocar la muerte.

Otro impacto tiene que ver con las producción de las botellas de plásticos PET, el proceso implica extracción y procesamiento de materias primas, como el petróleo, así como la energía utilizada en su fabricación. Estos procesos generan emisiones de efecto invernadero contribuyendo al cambio climático y sus impactos asociados.

También es requerida una gran cantidad de recursos naturales, como agua y energía. Además, el proceso de reciclaje de estas botellas también consume recursos y el uso continuo de estos puede poner presión adicional sobre el medio ambiente y los ecosistemas naturales.

2.7 PIRÓLISIS

La pirólisis es un proceso termoquímico que convierte la materia orgánica en un combustible utilizable de alta eficiencia calentándola a una temperatura moderadamente alta (350-650°C) y en ausencia de oxígeno. Por su poder de limpieza, es la forma más efectiva de competir con los combustibles no renovables (Sullivan & Ball, 2012).

Desde un punto de vista químico, la pirólisis es un proceso complejo. Por regla general, esto se realiza a través de una serie de reacciones, influenciadas por muchos factores: la estructura y composición de las materias primas, la tecnología utilizada, la velocidad de calentamiento, el tiempo de retención, la velocidad de enfriamiento y la temperatura del proceso (Sullivan & Ball, 2012).

Normalmente los productos sólidos se clasifican como cenizas y corresponden mayoritariamente a materiales inertes que pueden entrar en el proceso de acuerdo con la materia prima utilizada y el carbono formado por las reacciones que se pueden dar durante el proceso. Los productos gaseosos pueden clasificarse como gas de síntesis (syngas) y contienen los gases no condensables, como H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, CO, CO₂, entre otros.

Por último, el producto líquido suele clasificarse como biocombustible (o combustible sintético) y consiste en una mezcla de olefinas, fenoles y compuestos aromáticos caracterizados por la ausencia de oxígenos como sustitutos, tales como benceno, naftaleno, antraceno, tolueno, indeno, entre otros. La composición de cada una de estas corrientes también dependerá de la naturaleza o composición de los plásticos o residuos que se utilizan como materia prima en el proceso (Gil, Ardila Arias, & Barrera Zapata, 2019).

2.8 REACTOR DE PIRÓLISIS

Las diferentes posibilidades de operación de un reactor de pirólisis, así como la gran variedad de plásticos (y sus diferentes composiciones), dan lugar a una elevada combinación de subproductos que pueden tener diversas aplicaciones. De este modo, explorar las condiciones que favorezcan la producción y calidad de algún o algunos productos en particular (por ejemplo, los combustibles sintéticos) puede llegar a ser una tarea dispendiosa en tiempo y recursos, incluso a partir de una materia prima dada (Gil, Ardila Arias, & Barrera Zapata, 2019).

En ese aspecto, el uso razonable de herramientas computacionales que ayude a simular y predecir la cantidad y composición de los productos de pirólisis de plásticos se hace fundamental para estudiar y determinar las mejores condiciones de operación para la obtención de algún o algunos productos en particular a partir de la valorización de residuos plásticos (Gil, Ardila Arias, & Barrera Zapata, 2019). (Anexo 2)

2.9 REACCIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LOS PLÁSTICOS

La descripción de las reacciones de descomposición durante la degradación de los plásticos es bastante difícil, porque el proceso en si es muy complejo, además se considera que existen factores que influyen en la degradación térmica ya que puede ocurrir en ausencia o presencia de catalizadores, así como también otro factor importante es el tipo de reactor, el tipo de plástico y la cantidad (Zurita Garcés & Jordán Morales, 2018).

2.10 INTERCAMBIADOR DE CALOR

Los intercambiadores de calor se utilizan en muchas industrias, incluidas la petroquímica, la biotecnología, la energía, la refrigeración y la alimentación, con una necesidad creciente de diseño y construcción de intercambiadores de calor eficientes centrándose más desde el punto de vista térmico (A. Pérez Sánchez, 2019).

El crecimiento de la industria global ha llevado al desarrollo de nuevos intercambiadores de calor compactos que aumentan la velocidad del intercambio de calor, reducen el tamaño del intercambiador de calor y mejoran la eficiencia del proceso de calor implementados en estos dispositivos (A. Pérez Sánchez, 2019).

CAPITULO III

METODOLOGIA

3.1 VERIFICACION Y CLASIFICACION DE RESIDUOS PET

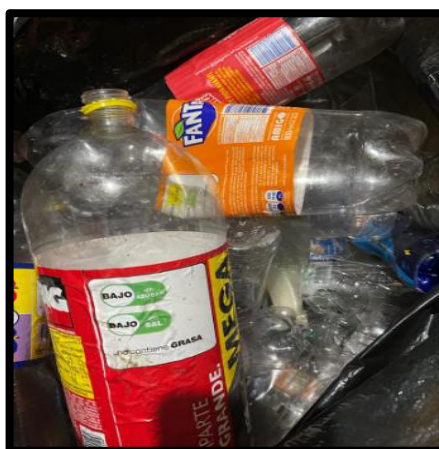
Se realiza la verificación y clasificación de los residuos PET, siguiendo la norma NTE INEN 2634:2012 “Disposición de desechos plásticos post- consumo”. Esto se presenció el capítulo 1 ya mencionado. Se comienza a separar revisando el número asignado según su composición de manera que se obtenga: 1 PET, 2 PEAD, 3 PVC, 4PE-BD, 5PP 6PS en otros. Se separa el residuo plástico (PET) que requerimos para la obtención del producto.

Se verifica de forma distintiva el número al que pertenece el residuo plástico, el mismo que se dispondrá a colocarse en un envase para así ser separado del otro. La clasificación a la descripción de la metodología de la normativa INEN, mencionada en el capítulo 1.

Se constará la clasificación de los plásticos en la Ilustración 4, se escogerá el residuo requerido que en este caso será el PET. Se lo visualizara en la Ilustración 5.

Ilustración 2

Clasificación de los materiales plásticos (PET)



Nota. Fuente: Autores

Ilustración 3

Separación del material requerido (PET)



Nota. Fuente: Autores

3.2 PRE – TRATEMIENTO DE LOS RESIDUOS PLASTICOS

Previo del ingreso de los residuos plástico al reactor se debe:

- Retiro de cualquier tipo de adhesivo en la MP.
- Limpieza de los envases para que los líquidos no influyan el proceso.
- Luego ponerlos a secar.
- Triturar su estructura para que ingrese mayor volumen en el reactivo.

Ilustración 4

Retiro de los adhesivos



Nota. Fuente: Autores

Ilustración 5

Envases Limpios



Nota. Fuente: Autores

Ilustración 6

PET Comprimido



Nota. Fuente: Autores

3.3 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

El reactor por utilizar cuenta con los siguientes elementos (Ilustración: 6)

- Tanque de espesor 1.5 mm
- Capacidad de 55 galones
- Calentamiento a base GLP
- 2 quemadores
- Termocupla
- Manómetro con capacidad de 14.5 Psi
- Escotilla con bisagra para el ingreso de MP
- Válvula de paso
- Salida de producto

Ilustración 7

Reactor de Pirolisis



Nota. Fuente: Autores

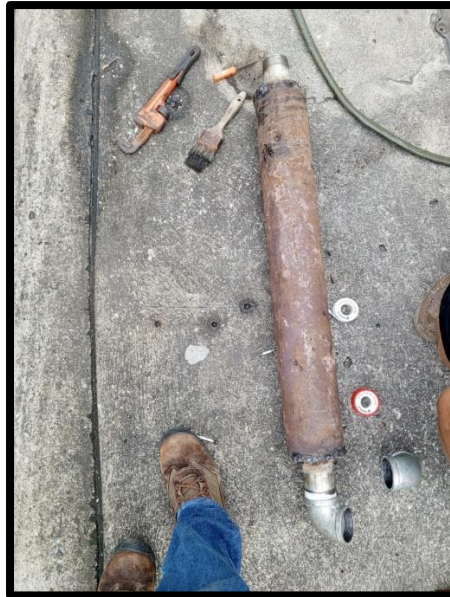
REACTOR

Sistema de enfriamiento de los gases luego de salir de reactor.

- Intercambio de doble camisa, tubo de 3 pulgadas externos, tubo de 2 pulgadas interno.
- Refrigeración de los gases a base de circulación de H₂O, mediante una bomba de ½ Hp.
- Tanque de agua para la recirculación para el enfriamiento con hielo

Ilustración 8

Intercambiador de calor



Nota. Fuente: Autores

Ilustración 9

Recirculación del agua



Nota. Fuente: Autores

3.4 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PIROLISIS – INICIO

Se procede a pesar la cantidad MP.

- Se comprime el plástico a ingresar
- Se introduce el plástico en reactor
- Se sella la escotilla con cerámica térmica para prevenir la filtración térmica

Ilustración 10

Encapsulado de la MP dentro del reactor



Nota. Fuente: Autores

Ilustración 11

Sellado de la escotilla



Nota. Fuente: Autores

Una vez encapsulado la materia prima en reactor se procede a sellar para hermetizar el mismo. (Ilustración 11)

Ilustración 12

Reactor cargado y sellado

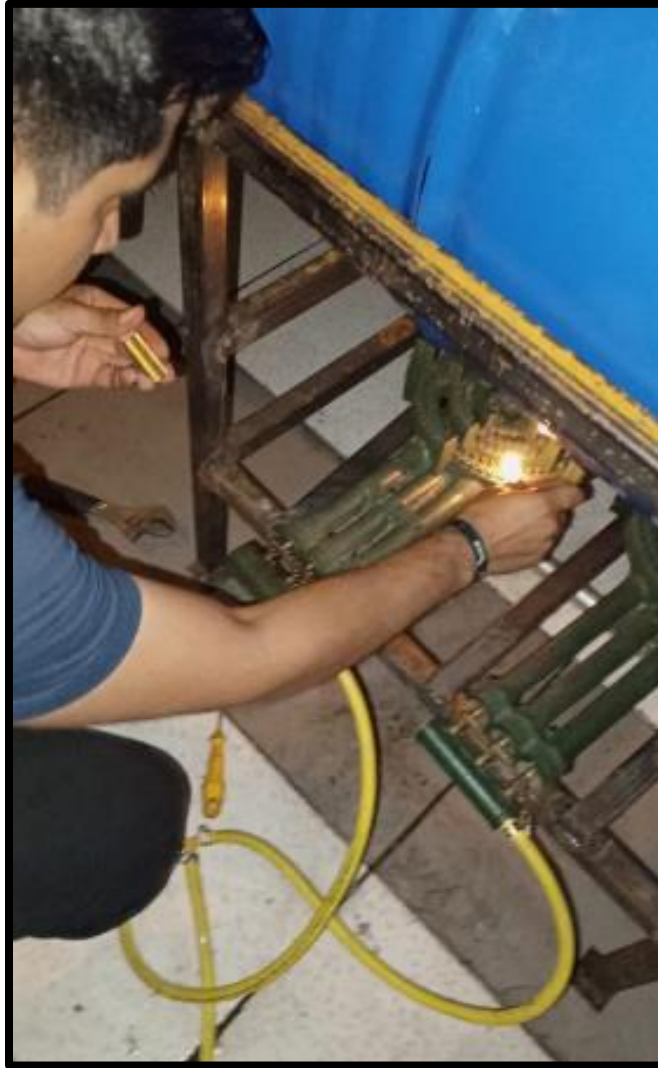


Nota. Fuente: Autores

Se verifica el tanque de gas previo a abrir las válvulas para enviar el GLP. También se verifica las válvulas de ambos quemadores. Luego se enciende los quemadores a media llave para que comience a calentar el reactor por 30 min.

Ilustración 13

Encendido de los quemadores



Nota. Fuente: Autores

Se conecta las mangueras en los intercambiadores para la recirculación del agua, luego se procede a encender la bomba. Previo al encendido se verifica que el tanque este lleno de agua con hielo. Para así poder enfriar los gases que salen del reactor.

Ilustración 14

Enfriamiento de los gases



Nota. Fuente: Autores

Ilustración 15

Recirculación del agua fría



Nota. Fuente: Autores

Ilustración 16

Obtención de hidrocarburo



Nota. Fuente: Autores

3.5 PROCESO PIROLISIS

Dentro del horno a alta temperatura se desarrolla el proceso de pirolisis, en donde se producen las reacciones demostradas en el capítulo 2.

Las variables que se manejarán son temperaturas óptimas, con tiempos de residencia y tipos de residuos plásticos que se obtuvieron en la previa clasificación. Tener presente que la temperatura máxima que se pueda alcanzar en el reactor es de 500°C.

La presión es constante debido que tendrá una salida controlada por una válvula de paso. La presión no debe ser mayor a 10 Psi, considerando la que la escotilla es metálica sellada con cerámica térmica.

Una vez encendido los gases ejercerán presión donde por la densidad de mismo buscaran por donde salir, la ruta que los llevara al intercambiador donde se procederá a condensar, a su vez separar el agua que llevara el condesado, mediante el cambio de temperatura.

Al finalizar el proceso, se revisa el envase que se tendrá a la salida del intercambiador, luego se determinara el peso y la cantidad de combustible obtenido vs la MP que se utilizó. Para determinar el rendimiento y la rentabilidad. (ilustración 16)

Ilustración 17

Producto Obtenido del proceso pirolisis



Nota. Fuente: Autores

Posterior, se procede a guardar el líquido de acuerdo con las especificaciones establecidas por la INEN 1984 – Normativa Ecuatoriana (NTE INEN 0930: Petróleo, crudo y sus derivados).

Una vez obtenido las muestras del producto final se procede a ponerlos envases herméticos de vidrio con su respectiva etiqueta identificativa (Ilustración 17)

Ilustración 18

Muestra de producto obtenido



Nota. Fuente: Autores

Las pruebas se realizaron con temperatura mayor a 200°C, con un tiempo de 20 a 45 minutos. La alta densidad de la MP que este ingresada en horno, dependerá la temperatura de trabajo adecuada.

3.6 ANALISIS DE LAS PROPIEDADES FISICAS DEL PROCESO PIROLISIS

De las muestras salientes obtenidas del proceso pirolisis de la MP PET, Se procede a realizar las siguientes pruebas. Físicas: Color y olor, densidad, punto de inmisión. (Ilustración 18), También se analizará los residuos obtenido en el proceso de destilación (Ilustracion19).

Ilustración 19

Producto liquido PET



Nota. Fuente: Autores

Ilustración 20

Residuos del proceso de degradación del plástico



Nota. Fuente: Autores

3.6.1 COLOR Y OLOR

Esto dependerá de la perspectiva del receptor, es decir mediante la vista y el olfato del observador.

Ilustración 21

Color del hidrocarburo obtenido



Nota. Fuente: Autores

3.6.2 DENSIDAD

Para determinar el índice de densidad del producto alcanzado de la materia prima PET, se toma como base la norma COVENIN 2052-93. Producto derivado del petróleo. Se determinará la densidad del líquido mediante:

Densidad: Es peso de masa de un volumen que tiene un material a una temperatura dada.

Densidad relativa: significa que es la relación de la masa de un volumen de material, a una temperatura T1. Y la masa de un volumen igual a de agua, a una temperatura de referencia T2. Cuando la temperatura de referencia es igual a 4°C y la temperatura a la que la densidad relativa del agua es igual a la unidad y la densidad son numéricamente iguales.

De manera fundamental se debe conocer la densidad del agua a 30°C. conociendo el volumen de muestra de 5 ml.

De igual forma se realiza la muestra de polietileno de alta densidad como poliestireno, esto debe estar libre de impurezas. Para determinar la densidad se procede aplicar la formula general de la densidad: (masa sobre volumen)

$$dw = \frac{Pw - Pv}{v}$$

$$dw = \text{densidad de la agua, } \frac{g}{ml}$$

$$Pv = \text{peso del picnómetro vacío } g$$

$$Pw = \text{peso del picnómetro con agua}$$

$$v = \text{volumen, } ml$$

Esto se toma como un indicador de calidad del crudo, esto proporciona un rendimiento en productos ligeros que se pueda obtener en su fraccionamiento (Rojas Gutiérrez, 2009). A nivel industrial en sector petrolero, se utiliza densidad API (grados de un densímetro), esto esta estandarizado por el American Petroleum Institute (Cordero López, 2003).

La densidad API es una escala relacionada con la densidad relativa del petróleo y determinada a 15.6/16.5°C (60/60°F), definida por la siguiente ecuación (INEN, 2001).

$$^{\circ}API = \frac{141.5}{GE(15^{\circ}C)} - 131.5$$

En donde:

$^{\circ}API$ = Densidad API

$GE(15^{\circ}C)$ = Gravedad especifica o Densidad relativa, adimensional.

En prima instancia la temperatura de ingreso es de 30°C, la temperatura de referencia 15°C, mediante la fórmula propuesta:

$$D(15^{\circ}C) = D(te) + b(te + 15^{\circ}C)$$

Donde:

$D(15^{\circ}C)$: Densidad de muestra referencial g/ml

$D(te)$: Densidad de muestra

b : Factor de corrección

t_e = Temperatura de ensayo, °C

El factor de corrección (b), está dada en base a la densidad obtenida por 30°C

Visualizado en la ilustración 22.

Ilustración 22

Factores de corrección (*b*)

<i>Rangos de D (t_c)</i>	<i>b</i>	<i>Rangos de D (t_c)</i>	<i>b</i>
0,680 – 0,689	0,00088	0,800 – 0,809	0,00070
0,690 – 0,699	0,00086	0,810 – 0,819	0,00069
0,700 – 0,709	0,00085	0,820 – 0,829	0,00068
0,710 – 0,719	0,00084	0,830 – 0,839	0,00067
0,720 – 0,729	0,00083	0,840 – 0,849	0,00066
0,730 – 0,739	0,00081	0,850 – 0,859	0,00066
0,740 – 0,749	0,00080	0,860 – 0,869	0,00066
0,750 – 0,759	0,00078	0,870 – 0,879	0,00065
0,760 – 0,769	0,00076	0,880 – 0,889	0,00065
0,770 – 0,779	0,00075	0,890 – 0,899	0,00064
0,780 – 0,789	0,00073	0,900 – 0,909	0,00063
0,790 – 0,799	0,00072	0,910 – 0,919	0,000625

Nota. Factor de corrección. Tomado de (Cabrera, 2014)

Luego, se para poder aplicar esta fórmula, se deberá obtener la gravedad específica

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

D(15°C): Densidad de la muestra a 15°C g/mol

D(15°C): Densidad del agua a 15°C g/mol

Mediante el API se determina la volatilidad del hidrocarburo

Tabla 3

Densidad de los plásticos

Plásticos	Densidad (g/cm ³)
PS	0,01-1,06
PP	0,85-0,92
LDPE	0,98-0,93
HPDE	0,94-0,98

PA, PA 6,6	1,12-1,15
PC	1,20-1,15
PU	1,20-1,22
PET	1,38-1,41
PVC	1,38-1,41
PTFE	2,10-2,30

Nota. Fuente: "Diccionario de polímeros" de Taiseisha Co., Ltd (1970)

Tabla 4

Densidad del coque

Sólido – Combustible	Densidad (g/cm ³)
Coque	1,2

Nota. Fuente: Coque de petróleo. Química.es.

3.6.3 VISCOCIDAD

Para determinar la viscosidad de un producto en estado líquido obtenido por un proceso pirolisis de residuos plástico Polietileno de Alta Densidad y el Poliestireno, como base la normativa NTE INEN 810:1986 “Producto de petróleo. Determinación de la Viscosidad de líquidos Transparente y Opacos”.

Viscosidad Cinemática: Es una medida de la resistencia interna de un fluido a fluir bajo fuerzas gravitacionales (Noria, 2020).

La viscosidad cinemática se calcula dividiendo la V_d (viscosidad) vs D (densidad) (NTE INEN 810: 1986).

$$V_{cw} = \frac{V_d}{D}$$

$V_{cw} = \text{viscosidad cinemática del agua, } \frac{m^2}{s}.$

$V_d = \text{viscosidad dinámica del agua, } N \cdot s/m^2$

$d_w = \text{densidad del agua, } Kg/m^2$

Viscosidad cinemática:

$$V_{cm} = C * t_m$$

$V_c = \text{viscosidad cinemática } cSt$

$C = \text{constante, } cSt$

$T_m = \text{factor tiempo}$

3.6.3 PUNTO DE INFLAMACIÓN

Para dar a conocer el punto de inflamación del producto líquido de los residuos plásticos, se utiliza como base la norma NTE INEN 808:1986 “Producto petróleo. Determinación de puntos de inflamación y combustión en vaso abierto Cleveland”.

Materiales utilizados:

- Fosforera
- Base metal
- Algodón

En primera instancia tener el recipiente donde se va a efectuar el proceso. De entrada, forrarlo con aluminio para aislarlo. Luego se procede a poner el líquido obtenido del proceso de pirólisis en el algodón luego con el mechero se procede a encender, luego se mide que temperatura alcanza, esto repetiremos 3 veces la prueba.

Ilustración 23

Punto de inflación



Nota. Fuente: Autores

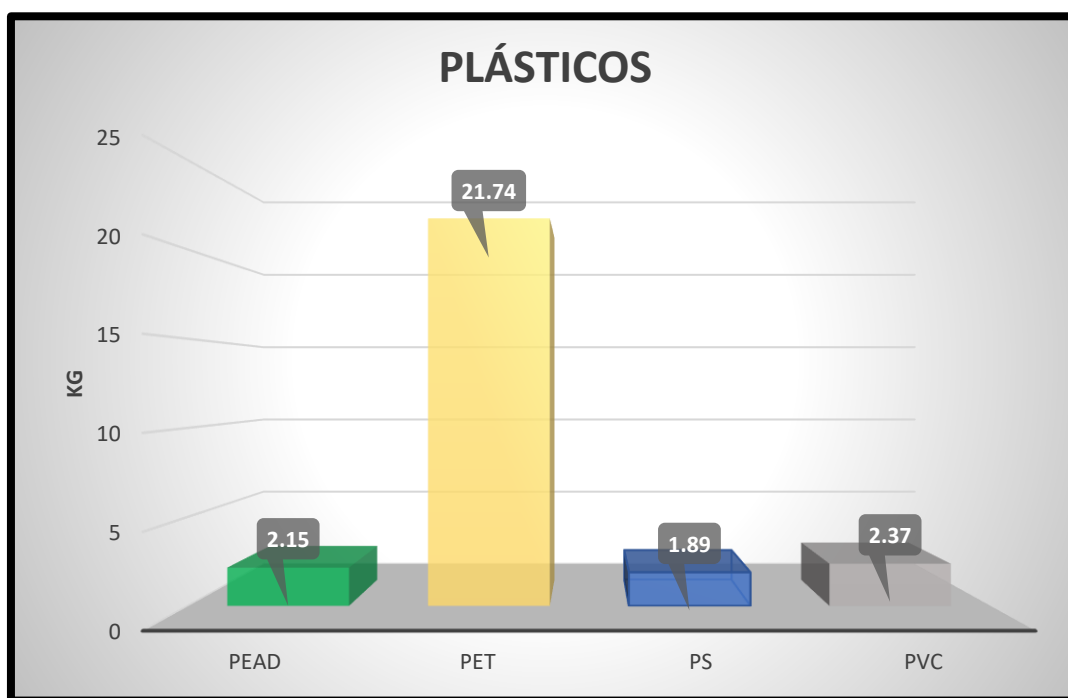
CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CLASIFICACION DE RESIDUOS PLASTICOS

Como se evidencia en la ilustración 2, el residuo plástico requerido en esta clasificación es PET. Se empezó a separarlo de los demás residuos tales como PEAD, PS, PVC y otro que se encontraron en la MP. PET (botellas de bebidas), PEAD (envases de aceite), PS (recipientes de yogurt).

Gráfico 1: Clasificación de los gráficos encontrados



4.2. PROCESO DE PIROLISIS A TEMPERATURAS MENORES DE 300°C

De acuerdo con los ensayos efectuados, que se visualiza en la (tabla 5) se obtiene rendimientos que visualizara en (tabla 6), en un lapso de permanecía de 1 hora. Se analiza los datos con la densidad del plástico PET (tabla 3).

Tabla 5

Material de entrada y salida del proceso

Ensayos	Carga (Kg)	Combustible (ml)	Gas (ml)	Coque (Kg)
Ensayo N° 1	3,54	0,00	531.89	2,44
Ensayo N° 2	6,20	0.42	1825.66	3,20
Ensayo N° 3	12,00	2,54	1353.98	8,81

Nota. Fuente: Autores

Tabla 6

Tabla de rendimientos del proceso

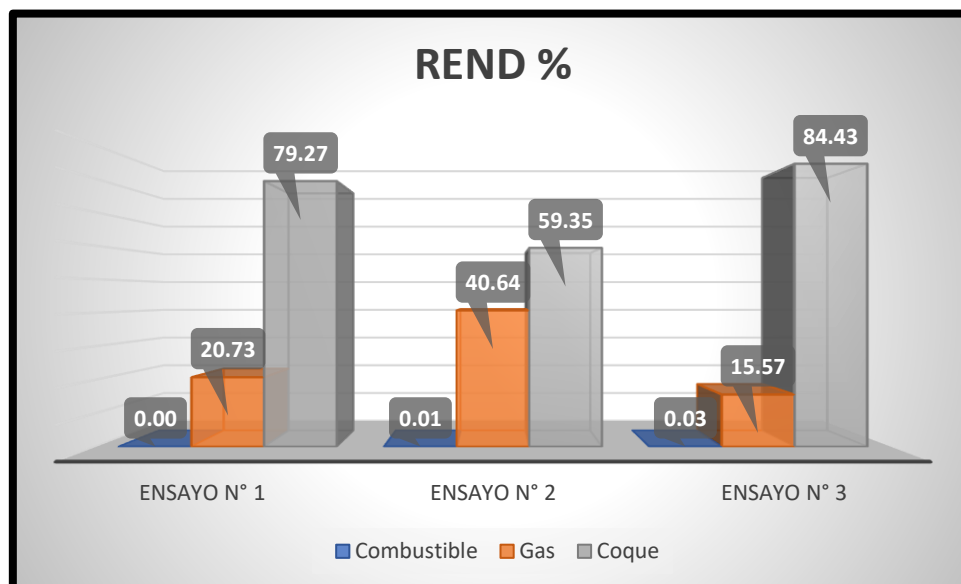
Ensayos	Combustible (%)	Gas (%)	Coque (%)
Ensayo N° 1	0,00	20,73	79,27
Ensayo N° 2	0,01	40,64	59,35
Ensayo N° 3	0,03	15,57	84,43

Nota. Fuente: Autores

En estos ensayos, luego realizar el proceso pirolisis. Se evidencio un gran desperdicio de gas más del 97%. Esto debido a las fugas que había en las uniones, también el sistema de condensación de gas no es el adecuado. Se obtiene un residuo sólido (coque) su densidad se menciona en la –(tabla 4), material cristalizado al fondo del tanque. Se obtiene esto porque se

está trabajando a temperaturas menores de 300°C por lo que en un proceso pirolisis no se debe realizar así. Debido a que requiere mayor calor termino.

Gráfico 2: Rendimiento del proceso



4.3. MUESTRAS DE ENSAYO OBTENIDAS DEL PROCESO PIROLISIS

Luego de cargar el reactor con la MP, se procedió a encender la bomba para la recirculación de agua en los intercambiadores. En los 2 últimos ensayos se añadió un balde con una manguera dentro con hielo y agua. Esto permitía forzar la condensación para alcanzar el objetivo, se procedió con el encendido de los 2 quemadores instalados en el reactor. Se procedió a abrir las válvulas de manera prolongada para ver el comportamiento de la destilación del producto cargado.

El tanque llegó a más de 350°C, pero a temperaturas mayores de 200°C, se generó cualquier cantidad de propano para verificar esto se cargó de gas una botella luego se procedió con el encendido de la botella. (Anexo 1)

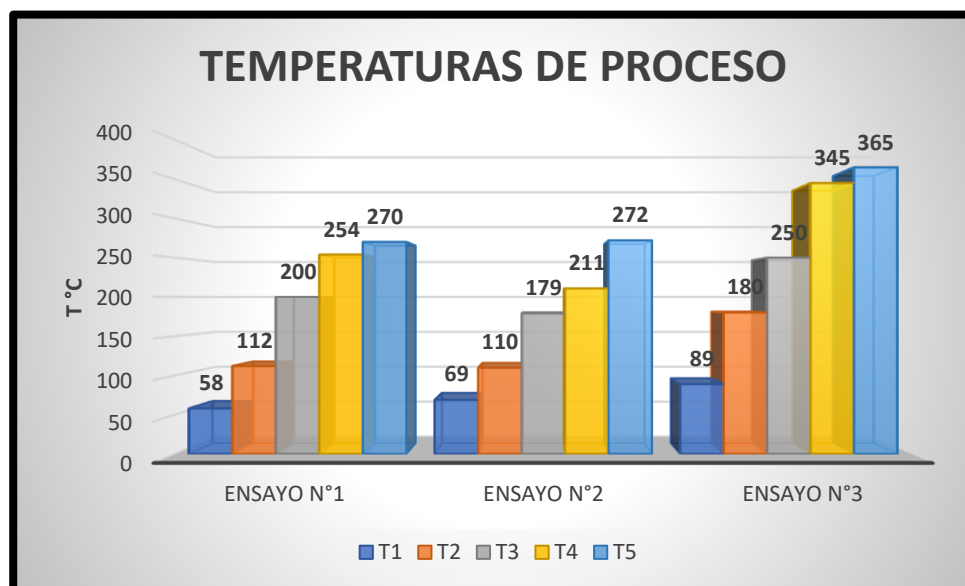
Ilustración 24

Temperatura de inicio de salida de los gases



Nota. Fuente: Autores

Gráfico 3: Temperaturas de los ensayos



Fuentes Autores

Ilustración 25

Ignición de los gases



Nota. Fuente: Autores

Para llegar a este punto, se tuvo que abrir las válvulas de los quemadores al máximo para así llegar a más 350°C, por lo que le permitió que la misma presión generada expulso el condensado que estaba atrapado en la línea.

Luego de una ardua espera se evidencio al final de salida el condesado. Se lo ubico dentro de un envase para al finalizar ser encendido para verificar si es inflamable, en efecto lo era. De manera inmediata nos dimos cuenta de que el sistema de enfriamiento no condensaba el gas por lo que salía muy poco líquido, pero una excesiva cantidad de gas propano.

4.4. IGNICION DE MUESTRAS LIQUIDAS Y GASEOSA

Al finalizar el proceso pirolisis de la última muestra de ensayo se almaceno una botella de 1L gas inflamable que salió también se almaceno la muestra liquida donde se constató un color claro, pero no transparente con un olor fuerte.

También se evidencio que partículas solididad de plástico que se los encendió y pero no hubo ninguna reacción química. Posterior a esto se colocó una fracción de muestra liquida obtenida del proceso y fue encendí se evidencio que le ignición fue en instante.

También se colocó otra fracción para ver qué tiempo se demoraba en consumirse líquido inflamable, dependiendo de la fracción liquida se mantendrá mayor tiempo encendí. Pero desde luego con el líquido el algodón se incendió más rápido pero también mantenía un encendido por más 10 segundos.

También se comprobó el encendido del algodón sin las muestras. Por qué se evidencio que tomaba mayor tiempo encenderse también el algodón queda.

Ilustración 26

Pruebas de Ignición



Nota. Fuente: Autores

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Con este proyecto se determinó que el proceso de pirólisis al que las botellas desechadas de tereftalato de polietileno (PET) al que fueron sometidas, es una opción viable de reciclaje y obtención de combustible líquido. A través del proceso de pirólisis, se logró descomponer el PET en sus componentes básicos, generando un producto líquido que puede ser utilizado como combustible.

Los resultados de este proyecto técnico muestran que la pirólisis de PET tiene el potencial de abordar de manera efectiva el problema de los desechos plásticos, al convertirlos en un recurso útil en forma de combustible. Esto no sólo reduce la cantidad de residuos plásticos existentes en el medio ambiente, sino que también contribuye a la producción de energía de una manera más sostenible.

Las pruebas realizadas fueron muestra para validar el funcionamiento del diseño del prototipo que se desarrolló para el proceso de pirólisis.

Durante las pruebas, se determinó que la temperatura óptima para que se desarrolle el proceso de pirólisis de las botellas plásticas debía ser mayor a 300 °C, debido a que a menos temperatura el proceso no se desarrolla en su totalidad.

Con respecto a las pruebas se concluye que el tereftalato de polietileno en el proceso de pirólisis puede llevarse a cabo en temperaturas que oscilan entre 350 °C y 500 °C. Si la temperatura llega a ser menor a la especificada, la descomposición llega a ser insuficiente. Mientras que a temperaturas más altas se formarían subproductos no deseados.

Otro aspecto importante es el tiempo de residencia del material, es decir, el tiempo que el material permanece en el reactor de pirólisis a la temperatura especificada varía según el diseño del reactor y la cantidad de residuos que se utilizan para alimentar el reactor. Esto puede oscilar entre varios minutos a varias horas.

Cabe recalcar que existen desafíos técnicos y ambientales asociados con la pirólisis del PET en los que se puede abordar. Esto incluye la optimización de los procesos de pirólisis para maximizar la eficiencia y minimizar la generación de subproductos no deseados, tales como la gestión de emisiones y residuos resultantes de este proceso.

En resumen, este proyecto respalda la viabilidad de la propuesta de elaboración de combustible por pirólisis a base de botellas desechadas de tereftalato de polietileno como una solución para la gestión de residuos plásticos y la producción de combustible alternativo. Sin embargo, se requiere una investigación adicional y un enfoque cuidadoso en aspectos técnicos y medioambientales para lograr una implementación exitosa y sostenible.

El Ensayo °3 de acuerdo de tabla3. Se obtuvo un mayor combustible debido a la cantidad de carga de plástico ingresada en el reactor. NO se obtuvo mayor combustible debido a la falta de condensación del gas (ilustración 24), esto es por falta de intercambio de calor, además se obtuvo coque como material sólido (ilustración 20).

5.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda una revisión exhaustiva de la investigación relacionada con la pirólisis del PET y la conversión de plásticos en combustible líquido ya que proporcionará bases fundamentales que permitirán identificar las lagunas existentes sobre el tema.

Se debe realizar una evaluación del impacto ambiental del proceso de pirolisis, incluyendo la comparación de emisiones y huella de carbono con otros enfoques de gestión de residuos y producción de energía.

Examinar las implicaciones económicas del proyecto, incluyendo los costos de implementación, la viabilidad financiera y comparar con otras opciones disponibles.

Se recomienda mantener las uniones lo más hermético posible para impedir la filtración de gas.

Mejor de intercambiador de calor, para poder condensar mayor cantidad gas y así obtener el combustible deseado.

BIBLIOGRAFÍA

- 123RF. (2023). *es.123rf.com*. Obtenido de 123rf:
https://es.123rf.com/photo_102500659_s%C3%ADmbolo-de-reciclaje-de-pl%C3%A1sticos-tri%C3%A1ngulo-de-reciclaje-con-n%C3%BAmero-y-signo-de-c%C3%B3digo-de-identificac.html?vti=m57or28v634cnm8q9g-1-26
- A. Pérez Sánchez, E. P. (2019). Diseño de un intercambio de calor de serpentín para el enfriamiento de acetona. *Nexo*, 61-74.
- Alcion*. (2 de marzo de 2021). Obtenido de www.alcion.com: <https://alcion.com/botellas-pet-que-son-y-cuales-son-sus-beneficios/#:~:text=Identificar%20las%20botellas%20PET%20es,n%C3%BAmero%201%20en%20su%20interior>.
- Aracil Sáez, I. (2008). Formación de contaminantes y estudio cinético en la pirólisis y combustión de plásticos (PE, PVC y PCP). *Tesis Doctoral*. Universidad de Alicante, Alicante. Obtenido de https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/9608/1/tesis_doctoral_ignacio_aracil.pdf
- Blasco, R. (4 de Abril de 2023). *www.unprofesor.com*. Obtenido de Un Profesor: <https://www.unprofesor.com/lengua-espanola/diferencia-entre-el-complemento-predicativo-y-el-atributo-173.html#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20el%20Atributo%3F,ser%2C%20estar%20y%20parecer>.
- Buenos Aires. (24 de mayo de 2017). *www.buenosaires.gob.ar*. Obtenido de Buenos Aires: <https://buenosaires.gob.ar/noticias/el-pet-y-su-reciclaje>

Cabrera, J. E. (2014). Estudio de viabilidad técnica preliminar para la obtención de combustibles mediante la pirólisis de residuos plásticos generados en la Universidad Politécnica Salesiana. *Tesis*. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca.

Cairplas. (2018). *www.cairplas.org.ar*. Obtenido de <https://cairplas.org.ar/plasticos/>

Cordero López, J. A. (2003). *Evaluación de las Propiedades Físico-químicas del Biodiesel Obtenido a partir de Aceite de Palma y Etanol, como Combustible Alternativo del Diesel 2D*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

Editorial RSyS. (1 de diciembre de 2021). *www.responsabilidadsocial.net*. Obtenido de <https://responsabilidadsocial.net/plasticos-que-son-caracteristicas-tipos-y-reciclaje/>

Envases del Mediterráneo. (23 de noviembre de 2020). Obtenido de www.envasesdelmediterraneo.com:
<https://www.envasesdelmediterraneo.com/blog/cuales-son-las-propiedades-del-pet-mas-importantes/>

Gil, S. A., Ardila Arias, A. N., & Barrera Zapata, R. (2019). *www.scielo.org.co*. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-34612019000200306#aff1

Gres, E. (3 de noviembre de 2017). *www.interempresas.net*. Obtenido de Interempresas: <https://www.interempresas.net/Construccion/Articulos/203427-Polimeros-para-la-Construccion-los-ingredientes-de-un-buen-pastel.html>

Haynie, M. (2023). *Plastics Technology México*. Obtenido de www.pt-mexico.com:
<https://www.pt-mexico.com/banco-de-conocimiento/secado-de-plasticos/tipos-de-resinas/pet-cristalino-vs-amorfo>

Hidalgo Loaiza, H. (2012). Diagnóstico del manejo de los residuos sólidos plásticos y de las actividades de reciclaje que se promueven en la ciudad de Puerto Montt y el análisis de una propuesta de segregación de residuos sólidos plásticos aplicable a una población de la ciudad. *Trabajo de titulación*. Universidad Austral de Chile, Puerto Montt. Obtenido de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2012/bpmfcih632d/doc/bpmfcih632d.pdf>

INEN. (2001). *Productos derivados del petróleo. Determinación de la densidad API*. Instituto Ecuatoriano de Normalización. Obtenido de <https://archive.org/details/ec.nte.2319.2001>

Laurila, H. (17 de Septiembre de 2019). *www.blog.beamex.com*. Obtenido de Beamex: [https://blog.beamex.com/es/unidades-de-temperatura-y-sus-conversiones#:~:text=Celsius%20\(%C2%B0C\),la%20misma%20que%20un%20kelvin](https://blog.beamex.com/es/unidades-de-temperatura-y-sus-conversiones#:~:text=Celsius%20(%C2%B0C),la%20misma%20que%20un%20kelvin).

Luna Rodríguez, L. A. (2019). Producción de combustible por pirólisis de desechos. Mexicali, Baja California.

Machado, J. (5 de ABRIL de 2022). *www.primicias.ec*. Obtenido de <https://www.primicias.ec/noticias/sociedad/desechos-residuos-plasticos-basura-ecuador/>

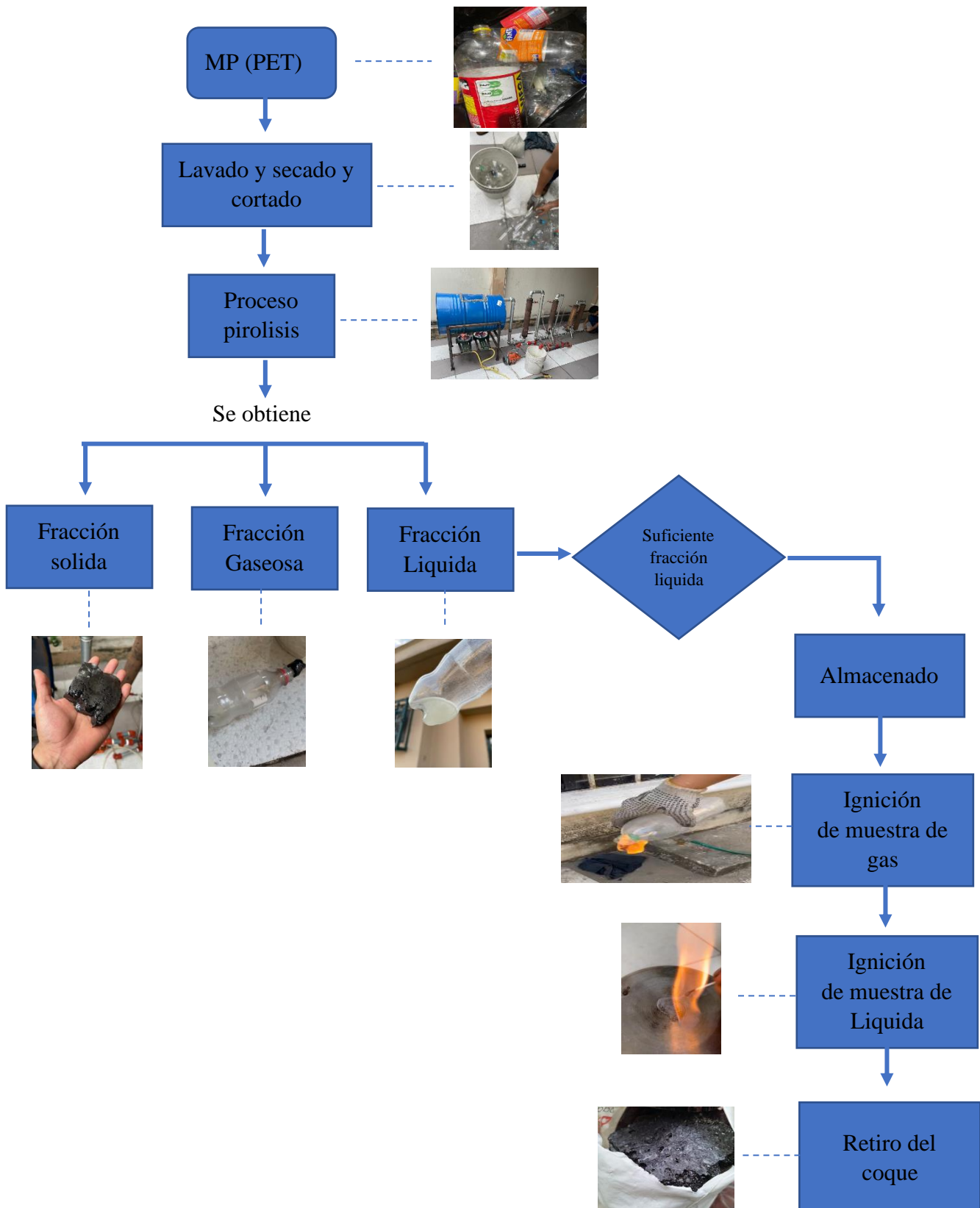
Morán, S. (30 de MARZO de 2022). *www.planv.com.ec*. Obtenido de <https://www.planv.com.ec/historias/plan-verde/desechos-plasticos-aun-ingresan-al-ecuador-sin-control#:~:text=Seg%C3%BAn%20el%20reporte%20del%202020,de%20este%20porcentaje%20es%20pl%C3%A1stico>.

- Noria. (13 de enero de 2020). *www.noria.mx*. Obtenido de Noria:
<https://noria.mx/uncategorized/la-viscosidad-cinematica-explicada/>
- Organización de las Naciones Unidas. (2021). *www.unep.org*. Obtenido de
<https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/informe-de-la-onu-sobre-contaminacion-por-plasticos>
- Pérez Porto, J. G. (20 de noviembre de 2009). *www.definicion.de*. Obtenido de Definición:
<https://definicion.de/optimizacion/#:~:text=Optimizaci%C3%B3n%20es%20la%20acci%C3%B3n%20y,la%20forma%20m%C3%A1s%20eficiente%20posible.>
- Planas, O. (9 de noviembre de 2016). *www.solar-energia.net*. Obtenido de Energía Solar:
https://solar-energia.net/termodinamica/propiedades-termodinamicas/temperatura#google_vignette
- Prieto, M. A. (1 de Septiembre de 2021). *Plastics Technology MÉXICO*. Obtenido de *www.pt-mexico.com*: <https://www.pt-mexico.com/articulos/problemas-decisivos-en-reciclado-de-pet-degradacion>
- Prieto, M. A. (31 de MAYO de 2023). *www.pt-mexico.com*. Obtenido de *Plastics Technology*:
<https://www.pt-mexico.com/articulos/la-pirolisis-como-opcion-de-reciclaje-quimico-para-poliiolefinas>
- Real Academia Española. (2022). *www.dle.rae.es*. Obtenido de Real Academia Española:
<https://dle.rae.es/petr%C3%B3leo>
- Re-ciclo. (25 de noviembre de 2013). *www.re-ciclo.com*. Obtenido de <https://re-ciclo.com/etiquetas/polietileno/>

- Rojas Gutiérrez, C. (2009). DETERMINACIÓN DE PESOS MOLECULARES DE CRUDOS Y FRACCIONES PETROLÍFERAS. *Trabajo de fin de carrera*. Universidad Rey Juan Carlos, Madrid. Obtenido de https://burjcdigital.urjc.es/bitstream/handle/10115/5584/08-09_Rojas%20Gutierrez_Carlos.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2012, julio). *NTE INEN 2634:2012*. Quito: Instituto Ecuatoriano de Normalización. Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/05/NTE-INENE-2634-Plasticos-post-consumo.pdf>
- Sullivan, A., & Ball, R. (2012). Thermal decomposition and combustion chemistry of cellulosic biomass. *Atmospheric Environment*, 133-141.
- Trade, W. (2023). *Waste Trade*. Obtenido de www.wastetrade.com: <https://www.wastetrade.com/es/resources/plastics/introduction-to-plastics/types-of-plastics/polyethylene-terephthalate/>
- Urien Pinedo, A. (2013). Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual. *Trabajo de Fin de Máster de Investigación*. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Obtenido de https://digital.csic.es/bitstream/10261/80225/1/BIOCARBONES_CENIM_CSIC.pdf
- Zurita Garcés, P. O., & Jordán Morales, W. D. (2018). *Diseño y construcción de un reactor de pirólisis térmica, para el aprovechamiento de residuos plásticos de polipropileno, generados en la Epoch*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

ANEXOS

ANEXO 1: Diagrama de flujo del proceso pirólisis



ANEXO 2: Equipo para el proceso pirolisis



ANEXO 3 Costos aproximados del proyecto

Descripción	Valor
2 quemadores, 1 T para gas y 1 válvula semi industrial.	\$ 83.00
2 Tanques azules	\$ 20.00
2 tubos grandes	\$ 49.00
Tubos cuadrados, platina y cabo	\$ 38.49
2 válvulas de cierre mariposa 2 llave cierre mariposa 2 cinta teflon 6 neplo 1x8 7 neplo 1/2x4 2 bushing	\$ 50.65
Cañería galvanizada ISO II 1(33.7x2.6mm) Cañería galvanizada ISO II 2(60.3x2.9mm) Cabo ideal 1/2 metro	\$ 67.13
Reductor galvanizado 4 A2 Codo Galvanizado 2 x90 Tee Galvanizada 2 reforzada Neplo galvanizado 2 x 4 reforzado	\$116.36
1 perno H 1 broca H 6 metros manguera	\$ 14.85
4 teflón pequeño 1/2 x 10 MT 2 bushing galvanizado 2 a 1/2 6 codo galvanizado 1 x 90 8 codo galvanizado 2 x 90 2 Tee galvanizada reforzada 4 neplo galvanizado 2 x 4 reforzado 2 Tee galvanizada 1 reforzada	\$ 87.85
Transporte	\$ 50.00
Tanque de gas	\$ 20.00
TOTAL	\$597.33