

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

Análisis de una alternativa para la producción de biocombustible a partir de la pirólisis de plásticos residuales post consumo de una bananera en el Ecuador.

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Químico

Presentado por:

Erick Nicolás Caicedo Pazmiño

Carlos David Cumba Burgos

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

A Dios por haberme permitido culminar exitosamente esta maravillosa etapa de mi vida. A mi madre Martha, por ser mi principal fuente de apoyo y soporte durante todo el trayecto. A mis hermanas Nicole, Gabriela y Valentina; por ser motivación y ejemplo de lucha y perseverancia.

Erick Nicolás Caicedo Pazmiño

El presente proyecto lo dedico a Dios por brindarme vida y salud. A mis abuelos: Fausto, Manuel y Rosario que pasaron a mejor vida, a mi abuela Mérida y a mi madre Carla que son mi motor para seguir adelante.

Carlos David Cumba Burgos

AGRADECIMIENTOS

A la ESPOL, por haber sido mi segundo hogar durante todo este proceso. A los maestros que, durante mi paso por la carrera, supieron nutrirme de conocimiento. A mi tutora de tesis Jenny Venegas, por su guía y consejos durante la realización de este trabajo.

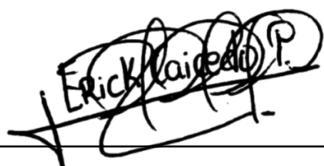
Erick Nicolás Caicedo Pazmiño

Mi más sincero agradecimiento a mi familia, amigos y profesores, que me han apoyado en todo este proceso universitario, y también a esas personas que estuvieron para mí y que actualmente no se encuentran conmigo. A la tutora de este proyecto, Jenny Venegas, ya que sus indicaciones y directrices fueron fundamentales para el desarrollo y culminación del mismo.

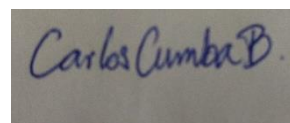
Carlos David Cumba Burgos

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponden conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Erick Nicolás Caicedo Pazmiño y Carlos David Cumba Burgos damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Erick Nicolás Caicedo Pazmiño



Carlos David Cumba Burgos

EVALUADORES

.....
Nadia Flores, MSc.

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
Jenny Venegas, MSc.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

En el mercado mundial de banano, las normas de calidad son cada vez más estrictas y requieren lograr eficiencia tanto en la producción como en el cuidado del racimo. Por esta razón se ha vuelto inevitable el uso de plásticos (mayormente PEAD) como bolsas, cintas, coberturas y mangueras; que, a pesar de ser de gran ayuda, desencadenan un alto índice de contaminación ya que generalmente, son desechados sin recibir ningún tipo de tratamiento.

El presente proyecto evalúa un método de aprovechamiento de plásticos desechados para la obtención de un biocombustible alternativo a través de un proceso de pirólisis. Este proceso se presenta como una solución medioambiental, evitando reacciones de combustión y minimizando la producción de gases contaminantes.

El ensayo de pirólisis se realizó a escala laboratorio, para ello se utilizó una olla de presión que cumplió la función de reactor pirolítico y un sistema de enfriamiento para la condensación de gases y obtención del biocombustible. Posteriormente se realizaron pruebas de caracterización y se obtuvo: una gravedad API de 31, una viscosidad cinemática de 3.08 cSt, un poder calorífico de 38488.67 J/g y una temperatura de destilación al 90% de 349°C. Los resultados obtenidos de estas pruebas fueron comparados con los valores establecidos en las normativas INEN y ASTM.

Tras la experimentación, se logró determinar que el biocombustible obtenido tenía propiedades muy afines a las del diésel. También se identificaron las condiciones óptimas de operación, siendo estas 400°C y 1.5 atm, alcanzando un rendimiento del 58.34%.

Palabras Clave: pirólisis, PEAD, biocombustible, bananera, ambiente.

ABSTRACT

In the world banana market, quality standards are increasingly strict and require efficiency in both production and care of the bunch. For this reason, the use of plastics (mostly HDPE) as bags, tapes, covers, and hoses has become unavoidable; despite being of great help, they trigger a high rate of contamination since they are generally discarded without receiving any type of treatment.

This project evaluates a method of using discarded plastics to obtain an alternative biofuel through a pyrolysis process. This process is presented as an environmental solution, avoiding combustion reactions, and minimizing the production of polluting gases.

The pyrolysis test was carried out on a laboratory scale, for which a pressure cooker was used that fulfilled the function of a pyrolytic reactor and a cooling system for the condensation of gases and obtaining biofuel. Subsequently, characterization tests were carried out and the following were obtained: an API gravity of 31, the kinematic viscosity of 3.08 cSt, a calorific value of 38488.67 J/g, and a distillation temperature at 90% of 349°C. The results obtained from these tests were compared with the values established in the INEN and ASTM regulations.

After experimentation, it was possible to determine that the biofuel obtained had properties very similar to those of diesel. Optimum operating conditions were also identified, these being 400°C and 1.5 atm, reaching a yield of 58.34%.

Keywords: pyrolysis, HDPE, biofuel, banana, environment.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	I
AGRADECIMIENTOS	II
DECLARACIÓN EXPRESA	III
EVALUADORES	IV
RESUMEN	V
ABSTRACT.....	VI
ÍNDICE GENERAL.....	VII
ABREVIATURAS.....	X
SIMBOLOGÍA.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Justificación del problema	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Marco teórico	4
1.4.1 Plásticos	4
1.4.2 Tipos de plásticos	5
1.4.3 Termoplásticos	5
1.4.4 Plásticos termoestables.....	6
1.4.5 Industria de plásticos en el Ecuador.....	6

1.4.6	Pirólisis	6
1.4.7	Propiedades del polietileno.....	7
1.4.8	Plastikgas: Planta de pirólisis en Ecuador	8
1.4.9	Biocombustibles	9
1.4.10	Tipos de crudo de acuerdo a sus grados API.....	9
CAPÍTULO 2		10
2.	METODOLOGÍA.....	10
2.1	Recolección de residuos plásticos.....	12
2.2	Selección de materia prima	12
2.3	Tratamiento preliminar de la materia prima	12
2.4	Instalación del equipo para el proceso de pirólisis.....	12
2.5	Ensayo de pirólisis a escala laboratorio.....	13
2.6	Pruebas de caracterización	14
2.6.1	Punto de inflamación	14
2.6.2	Grados API	14
2.6.3	Poder calorífico.....	15
2.6.4	Viscosidad cinemática	15
2.6.5	Destilación ASMT	16
2.6.6	Corrosión a la lámina de cobre.....	17
CAPÍTULO 3		18
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	18
3.1	Estimación de plásticos desechados y biocombustible producido.....	18
3.2	Determinación de la temperatura optima de operación	18
3.3	Balance de masa	19
3.4	Perfil de temperatura respecto al tiempo de reacción.....	20
3.5	Gravedad API	21
3.6	Viscosidad cinemática a 40°C	22

3.7	Poder calorífico.....	22
3.8	Destilación ASTM	22
3.9	Análisis de costos	25
3.9.1	Mercado.....	25
3.9.2	Costos por equipo	25
3.9.3	Costos por insumos	26
3.9.4	Flujo de caja del inversionista.....	26
CAPÍTULO 4		28
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	28
4.1	Conclusiones	28
4.2	Recomendaciones.....	29
REFERENCIAS.....		30
APÉNDICES		32
ANEXOS		34

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
PET	Polietilentereftalato
PEAD	Polietileno de alta densidad
PVC	Policloruro de vinilo
PEBD	Polietileno de baja densidad
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PU	Poliuretano
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
TMAR	Tasa mínima aceptable de rendimiento
VAN	Valor actual neto
TIR	Tasa de retorno de inversión

SIMBOLOGÍA

kg	Kilogramo
mL	Mililitro
atm	Atmósfera
\$	Dólares americanos (USD)
cSt	Centistokes
g	Gramo
h	Hora
CO ₂	Dióxido de carbono

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama de bloques del proceso.....	11
Figura 2.2 Equipo de pirólisis	13
Figura 2.3 Sistema para gravedad API	14
Figura 2.4 Calorímetro para determinar poder calorífico.....	15
Figura 2.5 Sistema para viscosidad cinemática	16
Figura 2.6 Sistema para destilación ASTM	16
Figura 2.7 Sistema para corrosión a la lámina de cobre	17
Figura 3.1 Rendimiento de los productos de la reacción de pirólisis.....	19
Figura 3.2 Temperatura vs tiempo de reacción.....	21
Figura 3.3 Curva de destilación ASTM.....	24
Figura 3.4 Curva de la estimación para la recuperación de inversión (Payback)	27

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Tipos de plásticos y sus monómeros	4
Tabla 1.2 Tipos de plásticos según la SPI	5
Tabla 1.3 Propiedades del polietileno de alta y baja densidad.....	8
Tabla 1.4 Propiedades del polietileno de alta y baja densidad.....	9
Tabla 3.1 Estimación mensual y anual de plásticos desechados y biocombustible producido	18
Tabla 3.2 Ensayo de pirólisis a diferentes temperaturas.....	19
Tabla 3.3 Balance de masa del proceso de pirólisis	20
Tabla 3.4 Temperatura del sistema respecto al tiempo de reacción	20
Tabla 3.5 Resultados de gravedad API.....	21
Tabla 3.6 Resultados viscosidad cinemática.....	22
Tabla 3.7 Resultados poder calorífico	22
Tabla 3.8 Resultados destilación ASTM.....	23
Tabla 3.9 Residuo y pérdida de la destilación ASTM.....	23
Tabla 3.10 Comparación de parámetros.....	24
Tabla 3.11 Costos por equipos para el proceso de pirólisis de plásticos	25
Tabla 3.12 Costos por insumos (por unidad) para la producción de biocombustible	26
Tabla 3.13 Indicadores económicos para la producción de biocombustible a nivel industrial.....	27

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

La conservación del medio ambiente es uno de los temas que se encuentra mayormente vigente a nivel mundial. Desde que se declaró el debilitamiento de la capa de ozono y la estimación del tiempo de vida del planeta, se ha buscado desarrollar nuevas alternativas para el cuidado y preservación de ecosistemas a fin de mitigar el impacto ambiental. Muchos de estos problemas ambientales se encuentran relacionados con las emisiones industriales, la contaminación o smog de los automóviles y los residuos plásticos que pueden tardar hasta 150 años en descomponerse. (Alvares & Carpio, 2019)

Los combustibles derivados del petróleo desprenden 8.88 gramos de CO₂ por galón de gasolina, mientras que los automóviles con motor a base de diésel desprenden un 15% más de CO₂ (Office of Transportation and Air Quality, 2014). Esto resulta significativamente nocivo para el ambiente, y, a pesar de que en la actualidad existen vehículos híbridos o eléctricos, el mercado de la gasolina sigue vigente, generando fuertes impactos ambientales.

El mal aprovechamiento de residuos plásticos post consumo impacta negativamente al ambiente, ya que su presencia afecta no solo a los ecosistemas sino también a las personas y seres vivos en general. Hoy en día, los plásticos, principalmente bolsas, se han vuelto aliados de muchas personas en actividades de transporte y almacenamiento. El aumento de productos fabricados con plástico es inevitable y gran parte de estos son desechados luego de su uso sin recibir un tratamiento adecuado. La producción y utilización de plásticos es un escenario en el que se encuentran inmersas la mayoría de industrias del sector productivo y social.

En consecuencia, se han estudiado algunas alternativas como medida de aprovechamiento de los componentes presentes en plásticos residuales para la obtención de nuevos productos. Algunos estudios han demostrado que el polietileno puede ser tratado mediante un proceso conocido como pirólisis, el cual permite

producir biocombustible. Este producto contiene cadenas de carbono similares a los de gasolina, keroseno y diésel (Proaño & Crespo, 2009). A partir de este criterio, se busca evaluar la posibilidad de, bajo el aprovechamiento de desechos plásticos post consumo, obtener un biocombustible que pueda disminuir el impacto ambiental y a su vez que sea económicamente rentable.

Las principales restricciones o limitantes del proyecto son:

- La pirólisis de plásticos, al ser una alternativa novedosa para el tratamiento de desechos plásticos, necesita mayor sustento experimental que valide la factibilidad del proceso para adquirir mayor aprobación por parte de la industria ecuatoriana.
- La “Ley Orgánica para la Racionalización, Reutilización y Reducción de Plásticos de un Solo Uso” implementada el pasado 21 de diciembre de 2020 tiene como finalidad disminuir el uso de plásticos de un solo uso y controlar la generación de residuos sólidos (Arzube, 2021), lo cual es significativamente positivo para el medio ambiente y la sociedad en general ya que promueve el reciclaje o industrialización de los desechos plásticos, no obstante, para fines del presente proyecto, esta nueva ley limita las fuentes de obtención de materia prima para la producción de biocombustible.
- Los costos de equipos requeridos para realizar el proceso de pirólisis, dado que a escala laboratorio se realizan únicamente análisis de pequeñas muestras para la validación del método, sin embargo, al tratarse de un proceso a mayor escala se necesitaría invertir un presupuesto en equipos, instalación y operación.
- La obtención de materia prima post consumo, dado que normalmente los residuos plásticos son dispuestos como basura inmediatamente luego de su uso.

1.2 Justificación del problema

La investigación surge a raíz del mal aprovechamiento de residuos plásticos post consumo y de cómo estos impactan negativamente al ambiente ya que su presencia afecta no solo a los ecosistemas sino también a las personas y seres

vivos en general. Hoy por hoy, no es secreto para nadie que el plástico se encuentra presente en muchos de los productos de consumo masivo. Además, a raíz de la pandemia del COVID-19 el uso de plásticos se disparó indiscriminadamente debido a que la mayoría de personas optó por la adquisición de artículos plásticos de un solo uso (Solíz, 2021). Desafortunadamente, apenas el 4% de estos, es reciclado o recibe un tratamiento adecuado para mitigar su impacto en el ambiente (Cobos, 2021), mientras que el porcentaje restante termina, en su mayoría, en el océano o es utilizado como relleno sanitario.

El aprovechamiento de plásticos residuales para la producción de biocombustible es una excelente alternativa que genera un impacto positivo en el ambiente. El beneficio radica no sólo por la correcta disposición brindada a los desechos plásticos sino también por los biocombustibles que suponen una fuente de energía renovable. Por otro lado, el proceso de pirólisis se presenta como una solución medioambiental, evitando reacciones de combustión y minimizando la producción de gases contaminantes.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar un método de aprovechamiento de desechos plásticos post consumo en una bananera en el Ecuador a partir del proceso de pirolisis para la obtención de biocombustible alternativo.

1.3.2 Objetivos Específicos

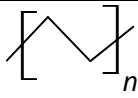
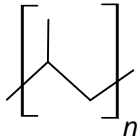
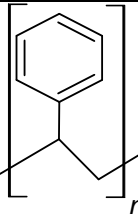
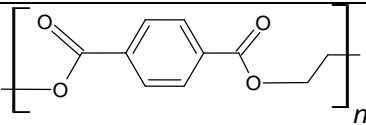
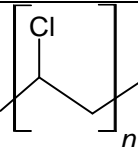
- Establecer las condiciones óptimas de operación en el sistema de pirólisis para la transformación desechos plásticos a biocombustible.
- Determinar las propiedades del biocombustible obtenido mediante ensayos fisicoquímicos y pruebas de caracterización.
- Demostrar la viabilidad técnica y económica del proyecto mediante la validación del método a escala laboratorio y la estimación de indicadores económicos.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Plásticos

Los plásticos son materiales constituidos por resinas sintéticas que se obtienen generalmente a partir de la polimerización de petróleo y otros componentes que encontramos en la naturaleza como: carbón, CO₂, celulosa y sal. Su aporte en la sociedad es muy significativo, pues solucionan muchas de las necesidades diarias de las personas, principalmente en situaciones de transporte y almacenamiento. El crecimiento poblacional y con ello la demanda de plásticos de consumo diario, han crecido exponencialmente, generando así, un aumento desenfrenado de residuos plásticos post consumo. (Perdomo, 2002)

Tabla 1.1 Tipos de plásticos y sus monómeros

Tipo de plástico	Monómero	Estructura
Polietileno (PE)	C ₂ H ₄	
Polipropileno (PP)	C ₃ H ₆	
Poliestireno (PS)	C ₈ H ₈	
Polietileno tereftalato (PET)	C ₁₀ H ₈ O ₄	
Policloruro de vinilo (PVC)	C ₂ H ₃ Cl	

Fuente: (INEN, 2021)








Con más de 8 millones de toneladas de plástico que ingresan al océano cada año, la humanidad debe repensar urgentemente la forma en que fabrican y usan los plásticos, para que la primera alternativa no sea su inmediata disposición como

basura. Muchas industrias, principalmente del sector agrícola, usan toneladas de plásticos contaminados con pesticidas para la conservación de sus productos, que luego son desechados. Sin embargo, hay ocasiones en las que estos plásticos post consumo son enviados a plantas recicladoras, pero en su mayoría son desechados en basureros o dispuestos como rellenos sanitarios.

1.4.2 Tipos de plásticos

Los residuos plásticos pueden presentarse de diferentes formas y su clasificación dependerá de la composición química de su estructura y su comportamiento al ser sometidos a ciertas condiciones de temperatura. Estos pueden ser clasificados como termoplásticos y termoestables. Sin embargo, existe un sistema de codificación presentado por la Sociedad de Industrias del Plástico (SPI) que permite categorizar el tipo de residuo plástico de uso cotidiano en hogares e industrias. (Arce & Suarez, 2017)

Tabla 1.2 Tipos de plásticos según la SPI

Código en la resina	Abreviatura	Nombre completo
	PET (PETE)	Polietilentereftalato
	PEAD (HDPE)	Polietileno de alta densidad
	PVC	Policloruro de vinilo
	PEBD (LDPE)	Polietileno de baja densidad
	PP	Polipropileno
	PS	Poliestireno
	Otros	Materiales multicapa y otras resinas. Poliuretano (PU). Biopolímeros.

Fuente: (INEN, 2021)

1.4.3 Termoplásticos

Los termoplásticos son plásticos que tienden a ablandarse al ser sometidos a un proceso de calentamiento, lo que les brinda la capacidad de ser remodelados.

Este tipo de plástico está constituido por cadenas poliméricas parcialmente ramificadas unidas por fuerzas débiles de tipo Van der Waals. Más de 78% del plástico total consumido en el mundo (alrededor de 170 millones de toneladas) corresponde a termoplásticos, y de estos la mayoría son polietilenos de alta y baja densidad.

1.4.4 Plásticos termoestables

Los plásticos termoestables son aquellos que se caracterizan por endurecer al calentarse. Este tipo de plásticos requiere condiciones específicas de temperatura y presión para su modelado, lo que les permite ser ampliamente utilizados en materiales rígidos, resistentes y capaces de soportar altas temperaturas. Por lo general, los plásticos termoestables presentan mayor resistencia, dureza y estabilidad dimensional frente a los termoplásticos.

1.4.5 Industria de plásticos en el Ecuador

Para el año 2019, en el Ecuador se generaron 528.000 toneladas de residuos plásticos equivalentes al 11% del total de desechos sólidos producidos en el país (Naranjo, 2019). La industria del plástico ecuatoriana provee de plásticos de un solo uso, tanto a los hogares como a los sectores automotriz, comercial, agrícola y bananero. Sin embargo, posee ciertas dificultades con respecto a los lineamientos por parte de ciertas políticas ambientales y económicas que exigen sin argumentos técnicos a reciclar y reutilizar materiales.

Por otro lado, el agotamiento de los recursos naturales y de los combustibles fósiles que limitan la producción a futuro (Revista Líderes Ecuador, 2018), obligan a buscar soluciones a corto y largo plazo para mantener a flote a la industria plástica y generar eficiencia en el uso de los recursos.

1.4.6 Pirólisis

El proceso de pirólisis ofrece una forma de recuperar combustibles, debido a que, al aplicar calor a estos materiales en ausencia de oxígeno, se pueden transformar en productos más valiosos en forma de gas, líquido y carbón (sólidos). Dependiendo el tipo de plástico con el que se trabaje, los productos de pirólisis

difieren y el rendimiento de los residuos sólidos puede obtenerse a partir de un análisis gravimétrico.

El tratamiento de pirólisis en PET y PVC produce una cantidad de residuos sólidos menor al 10% respecto al producto total. Por otro lado, al trabajar con PP, PS y PE; la cantidad de residuos sólidos producida es de menos del 2% respecto al producto total del proceso de pirólisis.

Los productos volátiles de PP y PE pueden condensarse y obtenerse como líquido o como cera, mientras que los de PS se obtienen mayoritariamente en forma líquida. En lo que respecta a los productos obtenidos al utilizar PET como materia prima, estos son principalmente sólidos debido a la naturaleza de sus componentes como ácido tereftálico y ácido benzoico.

Este proceso también es conocido como craqueo de polímeros, en donde se da la descomposición o reducción de las grandes cadenas de los polímeros a cadenas más pequeñas. Para este método se aprovecha el calentamiento a una temperatura de 350°C a 600°C, provocando vibraciones en las moléculas hasta que alcanzan a romper las fuerzas de van der Waals, posterior a la formación de cadenas cortas pasan a evaporarse. Es importante considerar que, si la energía de van der Waals es superior a la entalpía de los carbonos contenidos en la molécula, el enlace únicamente se romperá, mas no se evaporará.

Existe un orden establecido para la energía de disociación necesaria para fragmentar el enlace de los átomos, en donde ésta desciende según la clasificación del carbono (primario > secundario > terciario). Por consiguiente, las moléculas de polipropileno se rompen a una menor temperatura que las de polietileno, debido a que los carbonos en su composición son terciarios; explicando también que el LDPE es más sencillo de fragmentar que el HDPE, dado por el tamaño de la ramificación que éste posee. (Frączak, 2021)

1.4.7 Propiedades del polietileno

El polietileno es un tipo de plástico que se obtiene a partir de la polimerización del etileno. Este polímero es ampliamente utilizado en el mundo entero y es el plástico que presenta mayor demanda en cuanto a producción y

consumo. Existen dos tipos de polietileno comúnmente conocidos, el de alta densidad (PEAD) y el de baja densidad (PEBD).

Tabla 1.3 Propiedades del polietileno de alta y baja densidad

Propiedad	PEAD	PEBD
Densidad (g/cm ³)	0.94 – 0.97	0.91 – 0.94
Grado de cristalinidad (% de densidad)	62 – 82	42 – 62
Grado de cristalinidad (% de calorimetría)	55 – 77	30 – 54
Módulo de flexión (psi @ 73°F)	145000 – 225000	35000 – 48000
Módulo de tracción (psi)	155000 – 200000	25000 – 50000
Límite elástico por tracción (psi)	2600 – 4500	1300 – 2800
Resistencia a la tracción a la rotura (psi)	3200 – 4500	1200 – 4500
Alargamiento por tracción a la rotura (%)	10 – 1500	100 – 650
Dureza Shore tipo D	66 – 73	44 – 50
Resistencia al impacto Izod (ft-lb/in)	0.4 – 4.0	–
Temperatura de fusión (°C)	125 – 132	98 – 115
Temperatura de distorsión por calor (°C @66 psi)	80 – 90	40 – 44
Calor de fusión (cal/g)	38 – 53	21 – 37
Expansividad térmica (10 ⁻⁶ in/in/°C)	60 – 110	100 – 220

Fuente: (Peacock, 2000)

1.4.8 Plastikgas: Planta de pirólisis en Ecuador

La empresa estadounidense Plastikgas, escogió a Ecuador para implementar una planta de pirólisis en la ciudad de Quito, siendo así el primer país de Sudamérica en contar con esta innovadora idea. Esta empresa tiene como finalidad producir biocombustible a partir de la conversión de plásticos post consumo procedentes de industrias camaroneras, florícolas, bananeras y pesqueras. Los tipos de combustibles que se pueden obtener tras la conversión de la materia prima son: gasolina, parafina, coque, diésel, kerosene y GLP. La novedosa tecnología de Plastikgas permite que el material plástico se quemé en un reactor con atmósfera inerte a temperaturas que oscilan alrededor de 800°C. El vapor producido se condensa y mediante controles de temperatura, se obtiene el combustible destilado. (Plastics Technology México, 2019)

1.4.9 Biocombustibles

Los biocombustibles son una alternativa para recursos energéticos que, a pesar de que no presentan una solución que resuelva por completo los problemas ambientales y energéticos, aportan enormemente en forma complementaria a los procesos convencionales brindando una visión muy prometedora a largo plazo. (Ramos et al., 2016)

En términos generales, los biocombustibles presentan propiedades muy afines a los combustibles (principalmente diésel). Sin embargo, es importante realizar pruebas de caracterización de acuerdo a las normativas INEN y ASTM. Es indispensable realizar pruebas de densidad, viscosidad, corrosión a la lámina de cobre, presencia de impurezas e índice de acidez. De esta forma se puede asegurar que la composición y calidad del biocombustible se encuentra dentro (o fuera) de los límites permitidos. (Gandón et al., 2017)

1.4.10 Tipos de crudo de acuerdo a sus grados API

Los grados API corresponden a una medida que permiten determinar si un crudo es liviano o pesado, mediante la relación de su densidad respecto a la del agua a las mismas condiciones de temperatura. Dependiendo de la gravedad API que corresponda a un crudo este puede clasificarse como se muestra en la tabla a continuación. La determinación de esta propiedad es de gran importancia para la determinación de la densidad relativa de la muestra en estudio. (Intriago & Rodríguez, 2017)

Tabla 1.4 Propiedades del polietileno de alta y baja densidad

Crudo	Grados API
Extra-liviano	> 40
Liviano	>30 ≥40
Medio	>22 ≥30
Pesado	>10 ≥22
Extrapesado	≤10

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

El diseño del presente proyecto es de tipo práctico y demostrativo, el cual consiste en una serie de etapas que van desde una investigación primaria hasta el análisis e interpretación de resultados. En este sentido, se describen propiedades o características involucradas en cada etapa del proceso. (Hurtado, 2000)

Este proyecto, además, se encuentra apoyado en los métodos investigativo y analítico-sintético. Con el primer método se recopiló toda la información necesaria de diferentes fuentes (libros, *papers*, tesis de grado y post grado), fortaleciéndola con datos obtenidos a partir de herramientas como entrevistas y visitas de campo. Por otro lado, el segundo método permitió analizar e interpretar los resultados obtenidos para la posterior elaboración de las conclusiones del proyecto. (Hurtado, 2000)

La materia prima seleccionada para la ejecución del proyecto fue obtenida de una hacienda bananera ubicada en el cantón El Triunfo de la provincia del Guayas. De acuerdo la información recopilada, se conoce que esta hacienda en particular desecha alrededor de 25 000 bolsas plásticas al mes.

Para este proyecto en particular, la metodología podemos resumirla en estas 4 etapas que son:

- Obtención de muestras de desechos plásticos
- Identificación de los tipos de plásticos
- Ensayo de pirólisis a escala laboratorio y,
- Pruebas de caracterización

En la figura 2.1 se muestra el diagrama de bloques del proceso donde se observan las diferentes etapas del proceso con sus respectivas entradas y salidas.

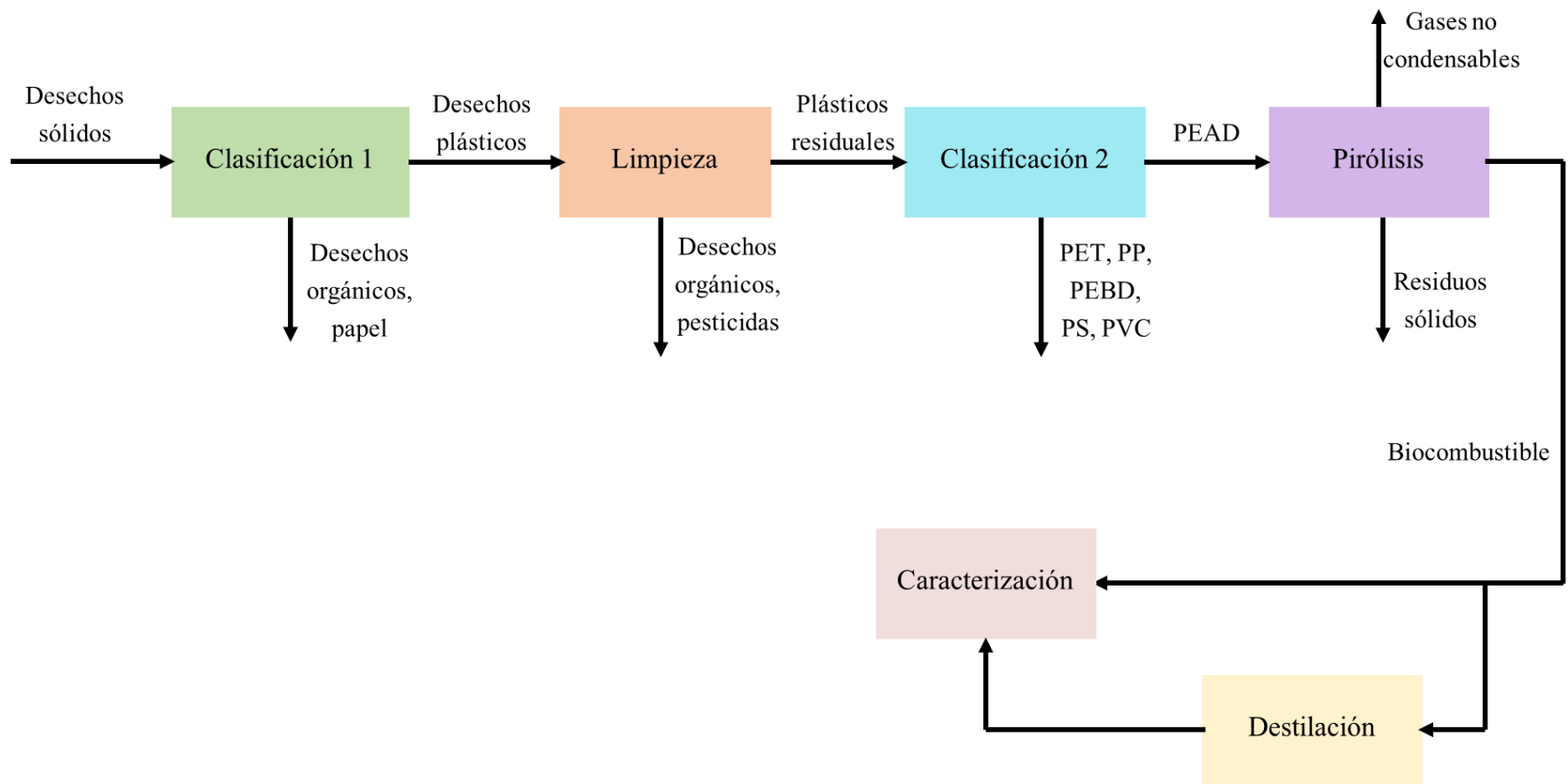


Figura 2.1 Diagrama de bloques del proceso

2.1 Recolección de residuos plásticos

Se recolectó material plástico post consumo de una bananera. Dentro de este grupo de plásticos se encontraron bolsas, corbatines, botellas y otros envases. Muchos de estos, contenían residuos orgánicos, papel o restos de fungicidas. Por ello, se separó todo tipo de residuos ajenos a los plásticos.

2.2 Selección de materia prima

Se categorizó los diferentes tipos de plásticos de acuerdo a la codificación otorgada por la SPI y a las especificaciones presentadas en la tabla 2. Luego, se seleccionó la materia prima (PEAD) y esta fue separada de los demás tipos de plásticos.

2.3 Tratamiento preliminar de la materia prima

Se realizó un lavado de las fundas plásticas para la remoción de materia orgánica y/o restos de fungicidas que no fueron removidos en la etapa de separación. Para ello, se preparó una solución de 30 g de bicarbonato de sodio en 250 mL de agua y, utilizando un atomizador se aplicó generosamente sobre la materia prima. Posterior a ello, se dejó esperar de 20 a 30 minutos, para proceder a lavar una última vez con agua, con el objetivo de retirar la solución e impurezas.

Luego, la materia prima se extendió sobre una superficie limpia para su respectivo secado bajo el sol, con el fin de reducir lo mayormente posible el contenido de humedad en las muestras plásticas. Finalmente, las fundas fueron cortadas uniformemente con una tijera para conseguir que esta quede totalmente homogénea previo a su uso.

2.4 Instalación del equipo para el proceso de pirólisis

El diseño del sistema de pirólisis se montó con materiales caseros. Se utilizó una olla a presión que cumplió la función del reactor pirolítico. En la salida superior de esta se adhirió un tubo de acero en forma de serpentín, el mismo que pasó por una hielera, con la que conjuntamente forman el sistema de condensación. También se utilizó una hornilla eléctrica con alcance de temperatura de hasta 400°C, para llevar a cabo el proceso de calentamiento. Adicionalmente, se utilizó un vaso de precipitación de 100 mL, utilizado para recoger el producto líquido en el extremo del tubo que sale por el sistema de condensación.

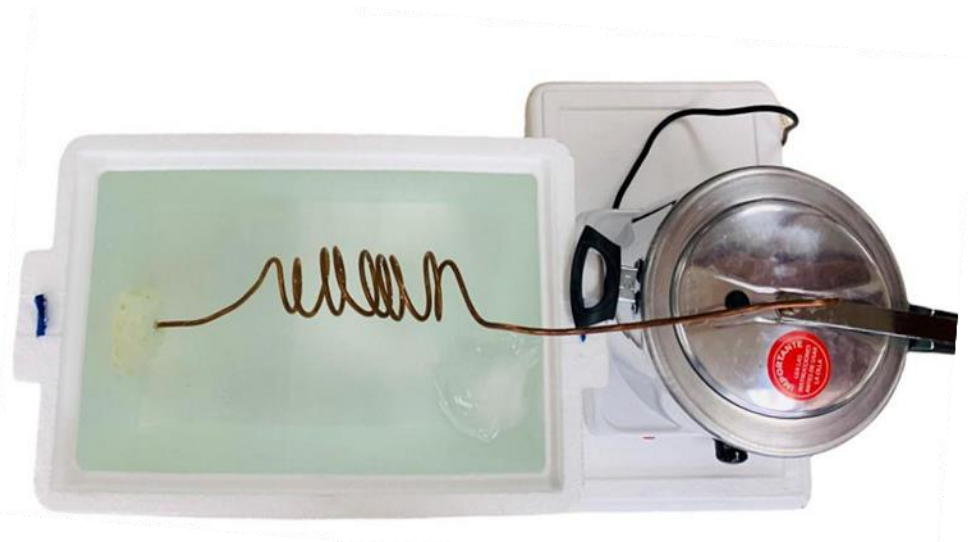


Figura 2.2 Equipo de pirólisis

2.5 Ensayo de pirólisis a escala laboratorio

Para el ensayo de pirólisis, inicialmente se pesaron 100 gramos de polietileno de alta densidad en una balanza analítica, que posteriormente fueron colocados en el interior de la olla de presión. Luego, la materia prima fue compactada dentro de la olla e inmediatamente se procedió a cerrar la misma. Consecuentemente, se acopló el sistema de refrigeración para favorecer la condensación de los gases producidos en el proceso de pirólisis. El tubo de acero en forma de serpentín pasó a lo largo de la hielera que fue llenada con agua a temperatura ambiente, de modo que el intercambio de calor entre ambos fluidos (agua y gases de pirólisis) sea más eficiente. Una vez ya montado todo el sistema, se procedió a dar inicio al proceso de pirólisis, para ello se calentó la olla de presión con ayuda de una hornilla eléctrica.

El proceso de pirólisis se llevó a cabo bajo condiciones de operación de 400°C y 1.5 atm. La duración de este ensayo fue de entre 50 y 60 minutos, de modo que, al finalizar la reacción, el producto líquido se recolectó en un vaso de precipitación colocado a la salida del condensador. Posteriormente, se dejó enfriar el sistema para recoger el producto sólido (residuos) contenido en el interior de la olla, para luego ser pesado. El proceso se realizó en reiteradas ocasiones hasta que la cantidad de producto líquido obtenido sea de aproximadamente 0.6 L, para realizar las respectivas pruebas de caracterización.

2.6 Pruebas de caracterización

Se realizaron pruebas de caracterización para identificar propiedades físicas y químicas del biocombustible obtenido en el proceso de pirólisis. A partir de estas pruebas se pudo estudiar el comportamiento del biocombustible para determinar el tipo de este de acuerdo a las normativas INEN y ASTM. Se realizaron las siguientes pruebas:

- Grados API
- Poder calorífico
- Viscosidad
- Destilación ASMT
- Corrosión a la lámina de cobre

2.6.1 Punto de inflamación

2.6.2 Grados API

Se determinó la gravedad API de acuerdo a la metodología descrita en la normativa NTE INEN 2903. El procedimiento de esta prueba consiste en colocar la muestra en una probeta de al menos 500 mL de capacidad, para luego introducir un hidrómetro corroborando que este no choque con las paredes de la bureta. Luego de que el hidrómetro se haya estabilizado se procede a leer el valor de los grados API correspondientes a la muestra en estudio. Adicionalmente, se mide la temperatura a la que se está llevando a cabo la prueba para realizar una corrección del valor observado de acuerdo a las tablas de gravedad API para petróleos. (INEN, 2015)



Figura 2.3 Sistema para gravedad API

2.6.3 Poder calorífico

La determinación del poder calorífico del biocombustible se realizó utilizando un calorímetro modelo C 200 de marca IKA. Para ello inicialmente se pesaron 0.5 g de muestra en un pequeño crisol que luego fue colocado en un portacrisol. Luego, se adhiere un hilo de algodón para que este entre en contacto con la muestra. Posteriormente se llena el tanque del calorímetro con 2 litros de agua aproximadamente, para luego colocar dentro de este, el recipiente para la descomposición. Es importante que la temperatura del agua que se agrega no supere los 20°C. Finalmente, se digita en el equipo, la cantidad añadida de muestra, se cierra la tapa superior y se espera alrededor de 20 min para que se muestre en la pantalla el resultado del poder calorífico. (Intriago & Rodríguez, 2017)



Figura 2.4 Calorímetro para determinar poder calorífico

2.6.4 Viscosidad cinemática

Para determinar la viscosidad cinemática se realizó el procedimiento NTE INEN 0810. El método consiste en medir el tiempo que tarda un volumen de líquido en fluir por gravedad a través de un viscosímetro (capilar de vidrio calibrado bajo una temperatura conocida y controlada). Esta metodología es aplicable a fluidos newtonianos de modo que el resultado dependerá del comportamiento de la muestra. Se deben añadir aproximadamente 10 mL por un extremo del capilar hasta que el primer bulbo se llene hasta la mitad o por encima de esta. Luego, se debe colocar el otro extremo del capilar a una bomba de vacío para succionar la muestra y hacer que esta suba hacia los dos capilares superiores. Se debe medir el tiempo de un determinado volumen de líquido en que se demora en fluir por acción de la gravedad a través de un tubo capilar del viscosímetro a una temperatura constante

de 40°C. Luego se multiplica la contante del viscosímetro por el tiempo para obtener el valor de la viscosidad. (INEN, 1986b)



Figura 2.5 Sistema para viscosidad cinemática

2.6.5 Destilación ASMT

Se realizó la prueba de destilación ASTM bajo el procedimiento presentado en la norma ASTM D-86. Esta prueba utiliza una unidad de destilación por lotes para determinar cuantitativamente las características del intervalo de ebullición de productos de petróleo. El procedimiento consiste en destilar una muestra de ensayo de 100 cm³ a diferentes condiciones de temperatura que no excedan los 380°C (la temperatura se irá incrementando a medida que los hidrocarburos de mayor peso se vayan condensando). El producto condensado debe ser recogido en recipientes de un volumen determinado, realizando lecturas simultáneas de temperatura de vapor y volumen recuperado de muestra. (Lorenzo, 2018)



Figura 2.6 Sistema para destilación ASTM

2.6.6 Corrosión a la lámina de cobre

Se realizó la prueba de corrosión a la lámina de cobre siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM D 130. Este procedimiento consiste en sumergir una lámina de cobre previamente pulida, lavada con iso-octano y secada con papel filtro, en una cantidad determinada de la muestra calentada a una temperatura y tiempo característico de la muestra. Luego, se realizan enjuagues con iso-octano, se seca con papel filtro y se realizan las respectivas comparaciones con la tabla 13 de la norma ASTM D 130. (ASTM, 2019)



Figura 2.7 Sistema para corrosión a la lámina de cobre

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Estimación de plásticos desechados y biocombustible producido

Según la información recolectada de la hacienda bananera, se conoce que desechan alrededor de 25 000 fundas plásticas por mes. Se conoce además (por previo pesaje), que una bolsa grande de las que normalmente se utilizan en esta bananera pesa alrededor de 0.085 kg. Con estos valores se puede estimar la cantidad mensual y anual de plásticos desechados y biocombustible producido. Adicional a ello, es necesario tener en cuenta que en cada ensayo de pirólisis se trabajó con 100 g de materia prima y se obtuvieron 79 mL (58.34 g) de biocombustible.

Tabla 3.1 Estimación mensual y anual de plásticos desechados y biocombustible producido

Descripción	Unidad	Cantidad
Fundas plásticas recicladas	Fundas/mes	25 000
Masa de cada funda	kg	0.085
Plásticos desechados/mes	kg/mes	2 125
Plásticos desechados/año	kg/año	25 500
PEAD usado en cada ensayo	g	100
Volumen de biocombustible obtenido	mL	79
Masa de biocombustible obtenido	g	58.34
Biocombustible obtenido/mes	L/mes	1 678.75
Biocombustible obtenido/mes	kg/mes	1 239.73
Biocombustible obtenido/año	L/año	20 145
Biocombustible obtenido/año	kg/año	14 876.7

3.2 Determinación de la temperatura óptima de operación

Se realizó el ensayo de pirólisis a escala laboratorio bajo diferentes condiciones de temperatura, siendo estas las que se detallan en la tabla a continuación.

Tabla 3.2 Ensayo de pirólisis a diferentes temperaturas

Producto	Unidad	Temperatura (°C)		
		350	400	550
Masa líquido	g	26.31	58.34	40.44
Masa sólido	g	61.19	30.66	24.83
Masa gas	g	12.5	11.01	34.73
Rendimiento	%	26.31	58.34	40.44

Con estos resultados se pudo elaborar el siguiente gráfico de barras donde se relaciona el rendimiento del proceso para los productos líquido, sólido y gaseoso respecto a las diferentes temperaturas de operación.

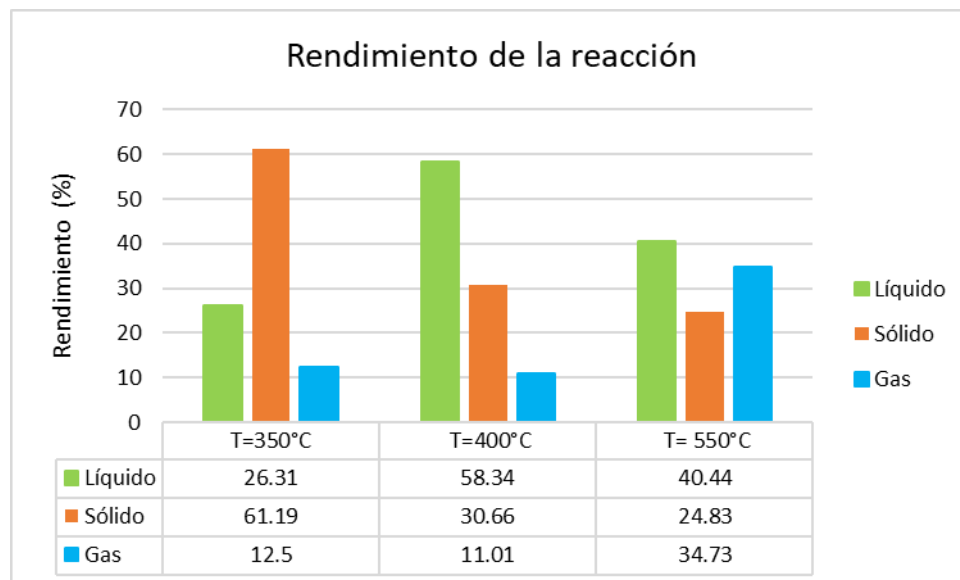


Figura 3.1 Rendimiento de los productos de la reacción de pirólisis

A partir del gráfico 1 se puede comparar la eficiencia de formación de productos a diferentes temperaturas. Sin embargo, dado que el producto de interés es el líquido, se estima que la temperatura óptima de operación es a 400°C, presentando un rendimiento del 58% respecto al líquido. Por otro lado, al trabajar con temperaturas de 350°C y 550°C, se alcanzan rendimientos de 26 y 40% respectivamente.

3.3 Balance de masa

Se realizó un balance de masa para 7 ensayos de pirólisis operando a la temperatura óptima previamente determinada. En cada ensayo se trabajó con 100 g de muestra (PEAD). Luego de terminar el proceso, se cuantificó la masa de cada

producto con su respectivo rendimiento, obteniendo los resultados que se detallan en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Balance de masa del proceso de pirólisis

Propiedad	Unidad	Ensayo							Promedio	σ
		1	2	3	4	5	6	7		
Temperatura inicial	°C	26	26	26.3	26	26.5	26.1	26.3	26.2	0.198
Temperatura de operación	°C	400	400	400	400	400	400	400	400	0
Materia prima										
Masa PEAD	g	100	100	100	100	100	100	100	100	0
Productos										
Masa líquido	g	58.19	58.88	57.64	58.56	58.03	58.14	58.92	58.34	0.47
Masa sólido	g	32.11	29.98	30.51	30.50	30.31	31.10	30.09	30.66	0.74
Masa gas	g	9.70	11.14	11.85	10.94	11.66	10.76	10.99	11.01	0.70
Rendimiento	%	58.19	58.88	57.64	58.56	58.03	58.14	58.92	58.34	0.47

3.4 Perfil de temperatura respecto al tiempo de reacción

Se tomaron datos de temperatura para cada ensayo en intervalos de 10 minutos por una hora. Con estos datos se pudo elaborar el perfil de temperatura respecto al tiempo de reacción.

Tabla 3.4 Temperatura del sistema respecto al tiempo de reacción

Tiempo (min)	Temperatura (°C)							Promedio	σ
	Ensayos								
	1	2	3	4	5	6	7		
10	110.0	106.0	113.0	112.0	119.2	105.7	110.5	110.9	4.6
20	253.0	247.0	254.0	252.6	263.4	240.2	250.0	251.5	7.1
30	386.0	400.0	391.0	388.0	394.0	400.0	378.9	391.1	7.7
40	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	0.0
50	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	0.0
60	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0	0.0

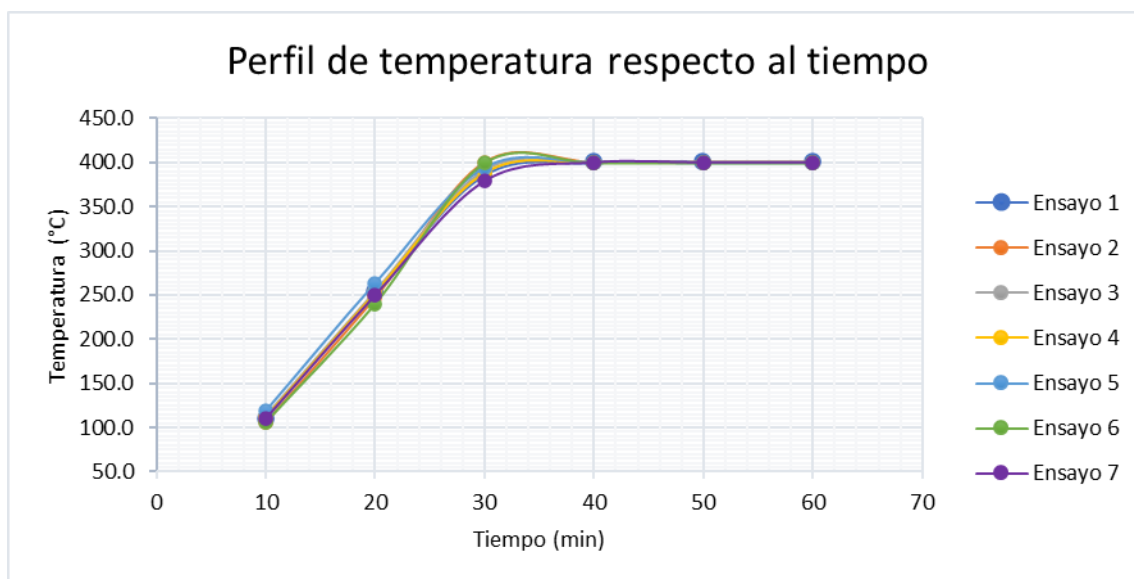


Figura 3.2 Temperatura vs tiempo de reacción

En el gráfico 2 se puede apreciar el comportamiento y distribución de la temperatura durante los ensayos de pirólisis. A partir del minuto 30, se empieza a converger al valor de temperatura óptima y es a partir de los 40 minutos donde el sistema ha alcanzado su estabilidad.

3.5 Gravedad API

Se determinó la gravedad API para el producto líquido de 3 ensayos de pirólisis. Los valores observados fueron corregidos con las respectivas tablas de crudos.

Tabla 3.5 Resultados de gravedad API

Gravedad API	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	σ
Valor observado	32.5	32.3	32.4	32.4	0.1
Temperatura (°F)	79	79	79	79	0
Valor corregido	31.1	30.9	31	31	0.1
Gravedad específica	0.87	0.87	0.87	0.87	0

De acuerdo a los valores obtenidos de gravedad API mostrados en la tabla 3.4, se puede mencionar que las muestras líquidas utilizadas en cada ensayo corresponden a crudos livianos de acuerdo a la tabla 1.4. A partir de estos valores se calculó la gravedad específica que se muestra en la tabla 3.4. Los resultados de esta prueba presentan buena relación entre sí ya que se obtuvo una desviación estándar de 0.1 y 0 para la gravedad API y gravedad específica respectivamente.

3.6 Viscosidad cinemática a 40°C

Se determinó la viscosidad cinemática del producto líquido. El promedio de los tiempos se multiplicó por el respectivo factor de corrección y se obtuvo el valor de la viscosidad en cSt, como se muestra en la tabla 3.6.

Tabla 3.6 Resultados viscosidad cinemática

Tiempo (s)	Promedio	Factor de corrección	Viscosidad cinemática (cSt)
75.33	73.845	0.04174	3.0822903
74.88			
72.45			
72.72			

De acuerdo al resultado arrojado en esta prueba se puede mencionar que el valor de la viscosidad es cercano al del diésel cuyo valor corresponde a 3.6 cSt.

3.7 Poder calorífico

Se determinó el poder calorífico para el producto líquido de 3 ensayos de pirólisis.

Tabla 3.7 Resultados poder calorífico

Prueba	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	σ
Poder calorífico (J/g)	38921	38923	37622	38488.67	750.556

De acuerdo a los resultados obtenidos, se tiene que la máxima cantidad de calor que puede generar el producto líquido de estudio es de alrededor de 38488.67 J/g. Este valor corresponde a la carga máxima de energía que puede liberarse entre la muestra líquida y un comburente.

3.8 Destilación ASTM

Se realizó la prueba de destilación ASTM a la muestra líquida obtenida del proceso de pirólisis.

Tabla 3.8 Resultados destilación ASTM

Volumen (mL)	Temperatura(°C)
1ª gota	64
10	201
20	219
30	233
40	246
50	258
60	274
70	291
80	327
90	349
96	357

A partir de la toma de datos mostrados en la tabla 3.8, se pudo determinar el porcentaje correspondiente al volumen de muestra recuperado, al residuo y a la pérdida. En esta prueba los valores de residuo y pérdida coinciden, de acuerdo a como se muestra en la tabla 3.9.

Tabla 3.9 Residuo y pérdida de la destilación ASTM

Recuperado (%)	96
Residuo (%)	2
Pérdida (%)	2

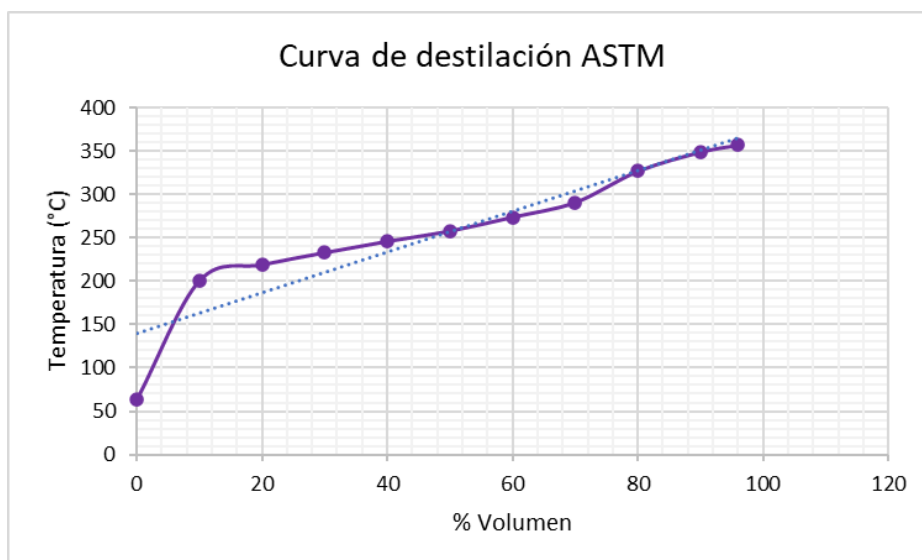


Figura 3.3 Curva de destilación ASTM

Con los datos previamente recopilados se pudo elaborar la curva de destilación ASTM, donde se observa las distintas temperaturas de equilibrio L-V respecto al volumen destilado en porcentaje. En esta figura, se puede apreciar las temperaturas de las fracciones correspondientes al 10% y al 50%, siendo estas de 64 y 258°C respectivamente. Además, se observa que se logró recuperar un 96% del total de la muestra líquida.

Tabla 3.10 Comparación de parámetros

Prueba	Unidad	Biocombustible	Diésel	Gasolina
Temperatura de destilación del 90%	°C	349	360	190
Viscosidad cinemática a 40°C	cSt	3.08	3.6	3-100
Gravedad API	°API	32.4	34	40
Poder calorífico	J/g	38923	42600	43500
Punto de inflamación	°C	46	40 -51	30-43

De acuerdo a la tabla 3.10 se puede apreciar que las propiedades del producto líquido obtenido del proceso de pirólisis contiene propiedades muy afines a las del diésel, por lo tanto, el producto líquido correspondería a un biodiésel.

3.9 Análisis de costos

3.9.1 Mercado

En el país se consume mensualmente 142 554 barriles de combustible “Diésel”, siendo Guayaquil una ciudad que consume un 20% de esa producción, se planificó cubrir el 2% de la demanda existente en el mercado (PETROECUADOR, 2021), ya que el tratamiento de residuos plásticos mediante proceso pirolítico para la obtención de biocombustible es un procedimiento relativamente nuevo en el país, y depende enormemente de la aceptación del mercado, debido a que es un producto nuevo y amigable con el ecosistema. De esta manera, se llega a una estimación de 23 949 galones de bio-combustible para la producción mensual.

3.9.2 Costos por equipo

Para la valoración de costos por equipos, se desarrolló teniendo en cuenta un reactor pirolítico, debido a que la proyección industrial se necesita una mayor conversión y capacidad de producción, en conjunto con un intercambiador de calor y un sistema de pretratamiento, reflejando un incremento en la inversión inicial para elaborar el proyecto. En la tabla 3.11 se detallan los costos de inversión por equipos a adquirir, dando un precio de \$76 450.00 considerando que el equipo más costoso es el reactor pirolítico, teniendo un valor de \$100 000.00.

Tabla 3.11 Costos por equipos para el proceso de pirólisis de plásticos

Descripción	Cantidad	Costo total 2021
Reactor pirolítico	1	\$100 000.00
Intercambiador de calor	2	\$14 500.00
Bomba centrífuga	4	\$1 950.00
Tanques de almacenamiento	2	\$5 000.00
Separador multifase	2	\$15 000.00
Secador	2	\$12 000.00
Batch con rociador	1	\$8 000.00
Triturador	1	\$10 000.00
Total		\$76 450.00

3.9.3 Costos por insumos

Los insumos requeridos para la producción de biocombustible a escala piloto se encuentran detallados en la tabla 3.12 Siendo los insumos más importantes los productos para pretratamiento y el plástico.

Los productos para pretratamiento poseen un costo de adquisición alto, por lo que se optó por elementos más económicos y que sean eficientes. La producción de biocombustible a partir de plásticos desechados de la industria bananera, resulta ser una excelente opción para beneficiar el desarrollo y economía del país, además de la disminución del impacto ambiental.

Tabla 3.12 Costos por insumos (por unidad) para la producción de biocombustible

Insumo	Unidad	Costo por unidad
Desechos plásticos	kg	\$0.60
Productos de pretratamiento	kg - gal	\$600

3.9.4 Flujo de caja del inversionista

Se evaluó la rentabilidad del proyecto considerando una producción anual de biocombustible empleando el proceso pirolítico de plásticos post consumo de la industria bananera. Teniendo en cuenta una producción de 7 832 galones por día de biocombustible, se estableció un valor de introducción al mercado de \$1.80, sabiendo que el producto se procesó mediante un método innovador y que su uso disminuye el impacto ambiental.

En el desarrollo del flujo de caja, se analizó: la inversión en equipos para llevar a cabo el proceso a nivel industrial, los costos fijos (consumo energético y gastos por administración) y los costos variables (costo de materia prima y operarios); con respecto al ingreso estimado por la venta del biocombustible producido.

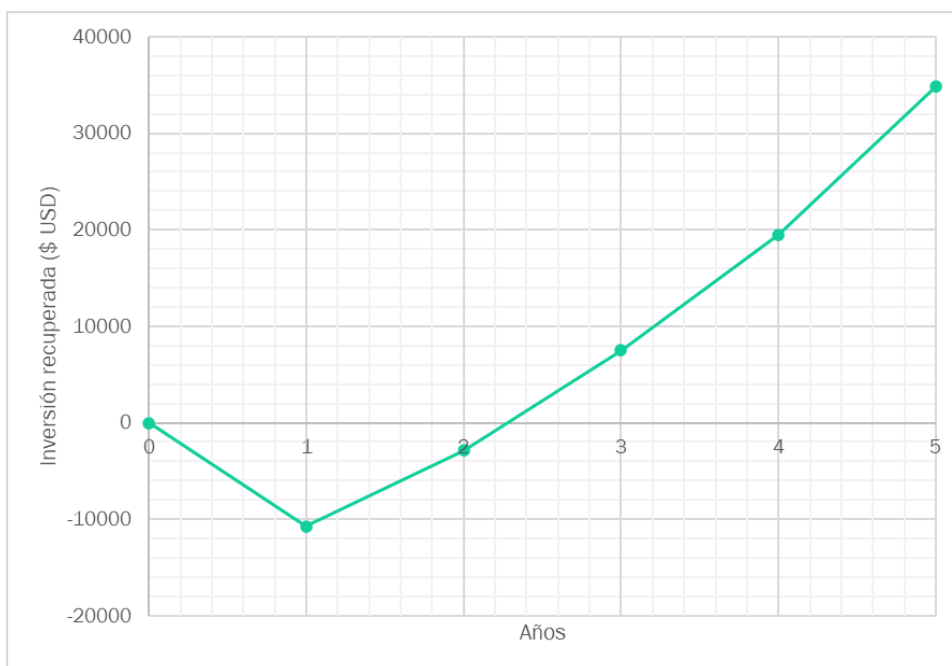


Figura 3.4 Curva de la estimación para la recuperación de inversión (Payback)

Aproximando a una inversión inicial de \$261 592.95, junto con los costos de implementación, de producción y los ingresos por la producción de 287 389 galones por año, se estimaron los indicadores económicos presentes en la tabla 3.13, en la cual se indica: un valor actual neto (VAN) de \$88 593.61 (positivo), una tasa del retorno de inversión (TIR) de 25.92% mayor a la tasa mínima aceptable de rendimiento (TMAR) de 18.91%, así también se determinó una recuperación de inversión a 2 años y 3 meses aproximadamente; demostrando que el desarrollo del proyecto es económicamente rentable y de gran beneficio para la industria automotriz y bananera, ya que para esta última se evitarían gastos por gestores de desechos por la reutilización de los mismos como materia prima para la producción de biocombustible.

Tabla 3.13 Indicadores económicos para la producción de biocombustible a nivel industrial

Valor actual neto (VAN)	\$88 593.61
Tasa de retorno de inversión (TIR)	25.92%
Tasa mínima aceptable de rendimiento (TMAR)	18.91%
Recuperación de inversión	2 años 3 meses

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Se logró establecer las condiciones óptimas de operación para el proceso de pirólisis, siendo estas cuando se trabajó con una temperatura de 400°C y una presión de 1.5 atm. Bajo estas condiciones el rendimiento de la reacción respecto al producto de interés (biocombustible) fue del 58.34%, mientras que para el producto sólido y para el producto gas fue de 30.66 y 11.01% respectivamente. Estos resultados denotan la importancia de controlar estos parámetros de operación para mejorar el rendimiento del proceso y la calidad del producto deseado.
- Se logró realizar pruebas de caracterización para la identificación de propiedades del biocombustible. Los resultados de las pruebas realizadas, mostrados en la tabla 3.13 fueron comparados con los valores establecidos en la normativa INEN para diésel y gasolina. A partir de ello se pudo determinar que el biocombustible obtenido tenía propiedades muy afines a las del diésel.
- Se evaluó el de obtención biocombustible alternativo mediante el proceso de pirólisis a desechos plásticos de una bananera, obteniendo un total de 408.38 g (553 mL) de producto obtenido a partir de 700 g de plástico a lo largo de 7 ensayos realizados a escala de laboratorio.
- Se demostró que el proyecto es técnicamente viable debido a que se obtuvo una conversión del proceso a escala de laboratorio del 59% aproximadamente; y también se estimaron indicadores económicos dando los siguientes resultados: tasa de retorno de inversión (TIR) del 25.92%, tasa mínima aceptable de rendimiento (TMAR) del 18.91% y valor neto anual (VAN) del \$88 593.61, teniendo una recuperación de inversión a 2 años y 3 meses, por consiguiente, la implementación del proyecto resulta ser económicamente factible a escala industrial.

4.2 Recomendaciones

- Al momento de armar el sistema de destilación es importante asegurar la hermeticidad del mismo para evitar fugas o pérdidas de producto en forma de vapor y para que no disminuya la presión de operación.
- Evaluar una alternativa que permita recuperar el monómero inicial del polietileno utilizado como materia prima.
- Desarrollar el proceso de pirólisis con otros tipos de plásticos y comparar factibilidad y rendimientos al utilizar diferentes fuentes de materia prima.
- Considerar aumentar la concentración de la solución para el pretratamiento de materia prima (plásticos desechados), ya que podría más eficiente al realizar la limpieza, sin embargo, una concentración exagerada dañaría el plástico.
- Cuando el sistema esté operando, tener en cuenta la temperatura del intercambio de calor, puesto que, si no está en óptimas condiciones, el producto no tendrá una buena condensación y se escapará como vapor.

REFERENCIAS

- Alvares, M., & Carpio, I. (2019). *Estudio bibliográfico preliminar para la producción de plásticos biodegradables a partir de harina de yuca*. Universidad Católica San Pablo.
- Arzube, F. (2021). *Análisis a la ley de plásticos de un solo uso (Ley Orgánica para la Racionalización, Reutilización, y Reducción de Plásticos de un solo uso) y propuestas para su efectividad jurídica*. Universidad de Guayaquil.
- ASTM. (2019). *Standard Test Method for Corrosiveness to Copper from Petroleum Products by Copper Strip Test*. <https://www.astm.org/d0130-19.html>
- Cobos, V. (2021). *Percepción social sobre el consumo de plástico de un solo uso en el cantón Guayaquil - Ecuador*. Universidad de Guayaquil.
- Frączak, D. (2021). *Chemical Recycling of Polyolefins (PE, PP): Modern Technologies and Products*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.99084>
- Gandón, J., Torres, Y., & García, M. (2017). Caracterización de un biocombustible obtenido a partir de aceite vegetal de desecho. *Tecnología Química, XXXVII(2)*, 278–292. <https://doi.org/10.1590/2224-6185.2017.2>.
- Hurtado, J. (2000). *Metodología de la Investigación Holística (Segunda)*. Fundación Sygal. <https://ayudacontextos.files.wordpress.com/2018/04/jacqueline-hurtado-de-barrera-metodologia-de-investigacion-holistica.pdf>
- INEN. (1986a). Determinación de los puntos de inflamación y combustión. *Norma Técnica Ecuatoriana*, 1–3. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/808.pdf>
- INEN. (1986b). Productos de petróleo. Determinación de la viscosidad cinemática y dinámica en líquidos transparentes y opacos. *Norma Técnica Ecuatoriana*, 1–6.
- INEN. (2013). Productos de petróleo. Determinación del residuo de carbón (Conradson). *Norma Técnica Ecuatoriana*, 1–5.
- INEN. (2015). Petróleo y productos derivados de petróleo. Determinación de la densidad, densidad relativa o gravedad API, método del hidrómetro. *Norma Técnica Ecuatoriana*, 2–8. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte-inen-2903.pdf>
- INEN. (2021). Disposición de desechos plásticos post-consumo. Requisitos. *Instituto*

Ecuatoriano de Normalización, Primera, 4–9.

- Intriago, S., & Rodríguez, P. (2017). *Degradación térmica de poliestireno en un reactor pirolítico tipo Batch para la producción de combustible alternativo*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Lorenzo, A. (2018). *Norma ASTM D86 o Método de Ensayo Estándar para Destilación de Productos de Petróleo a Presión Atmosférica*. ASTM. https://kupdf.net/download/norma-astm-d86_5bfe04c8e2b6f5a534d56244_pdf
- Office of Transportation and Air Quality. (2014). *Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle* (EPA-420-F-14-040a). <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P100JPPH.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2011+Thru+2015&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=>
- Peacock, A. (2000). *Handbook of Polyethylene: Structures: Properties, and Applications - Andrew Peacock - Google Libros*. Marcel Dekker. https://books.google.com.ec/books?id=OPuWyxwJwJwC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- PETROECUADOR. (2021). *INFORME ESTADÍSTICO SUBGERENCIA DE PLANIFICACIÓN Y CONTROL DE GESTIÓN*.
- Plastics Technology México. (2019, August 22). Desechos de plásticos se transformarán en combustible en Ecuador. *Gardner Business Media*. <https://www.pt-mexico.com/noticias/post/desechos-de-plasticos-se-transformaran-en-combustible-en-ecuador>
- Proaño, O., & Crespo, S. (2009). Obtención de combustibles a partir de residuos plásticos. *Revista Politécnica*, 30 (1), 137–144. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/5522>
- Solíz, M. (2021). *La Partida 3915: Importación de desechos plásticos en Ecuador* (M. Solíz (ed.); Primera Ed). Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador.

APÉNDICES

APÉNDICE A. Flujo de caja para el escalamiento industrial

DETALLE	2021	2022	2023	2024	2025	2026
VENTAS	\$ 517.299,96	\$ 535.405,45	\$ 554.144,64	\$ 573.539,71	\$ 593.613,60	
Costos Variables	\$ (171.483,75)	\$ (177.485,68)	\$ (183.697,68)	\$ (190.127,10)	\$ (196.781,55)	
MARGEN DE CONTRIBUCION	\$ 345.816,21	\$ 357.919,77	\$ 370.446,96	\$ 383.412,61	\$ 396.832,05	
Costos Fijos	\$ (156.531,81)	\$ (156.531,81)	\$ (156.531,81)	\$ (156.531,81)	\$ (156.531,81)	
Depreciación	\$ (20.961,55)	\$ (20.961,55)	\$ (20.961,55)	\$ (20.961,55)	\$ (20.961,55)	
Amortización de activos diferidos	\$ (1.804,85)	\$ (1.804,85)	\$ (1.804,85)	\$ (1.804,85)	\$ (1.804,85)	
UTILIDAD OPERATIVA	\$ 166.517,99	\$ 178.621,56	\$ 191.148,75	\$ 204.114,40	\$ 217.533,84	
Gastos Financieros (Intereses)	\$ (34.979,74)	\$ (31.534,98)	\$ (27.669,61)	\$ (23.332,28)	\$ (18.465,36)	
UTILIDAD ANTES DE PARTICIPACION	\$ 131.538,25	\$ 147.086,58	\$ 163.479,14	\$ 180.782,12	\$ 199.068,48	
15% TRABAJADORES	\$ (19.730,74)	\$ (22.062,99)	\$ (24.521,87)	\$ (27.117,32)	\$ (29.860,27)	
UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS	\$ 111.807,51	\$ 125.023,59	\$ 138.957,27	\$ 153.664,80	\$ 169.208,21	
25% IMPUESTOS	\$ (27.951,88)	\$ (31.255,90)	\$ (34.739,32)	\$ (38.416,20)	\$ (42.302,05)	
UTILIDAD NETA	\$ 83.855,63	\$ 93.767,69	\$ 104.217,95	\$ 115.248,60	\$ 126.906,16	
Amortización Deuda	\$ (63.192,39)	\$ (63.192,39)	\$ (63.192,39)	\$ (63.192,39)	\$ (63.192,39)	
Depreciación	\$ 20.961,55	\$ 20.961,55	\$ 20.961,55	\$ 20.961,55	\$ 20.961,55	
Amortización de diferidos	\$ 1.804,85	\$ 1.804,85	\$ 1.804,85	\$ 1.804,85	\$ 1.804,85	
Inversión	\$ (261.592,95)					
Capital de trabajo	46.412,58					
Préstamo	(46.412,58)					
Valor de Liquidación de Capital de trabajo						
Reinversión de Activos Fijos						
Valor de desecho de Activos Fijos				\$ 459,34		
FLUJO DE CAJA NETO	\$ (261.592,95)	\$ 43.429,64	\$ 53.341,70	\$ 64.251,30	\$ 74.822,61	\$ 86.480,17

DETALLE	2027	2028	2029	2030	2031
VENTAS	\$ 614.390,07	\$ 635.893,73	\$ 658.150,01	\$ 681.185,26	\$ 705.026,74
<i>Costos Variables</i>	\$ (203.668,90)	\$ (210.797,31)	\$ (218.175,22)	\$ (225.811,35)	\$ (233.714,75)
MARGEN DE CONTRIBUCION	\$ 410.721,17	\$ 425.096,41	\$ 439.974,79	\$ 455.373,90	\$ 471.311,99
<i>Costos Fijos</i>	\$ (156.531,81)	\$ (156.531,81)	\$ (156.531,81)	\$ (156.531,81)	\$ (156.531,81)
<i>Depreciación</i>	\$ (20.961,55)	\$ (20.961,55)	\$ (20.961,55)	\$ (20.961,55)	\$ (20.961,55)
<i>Amortización de activos diferidos</i>	\$ (1.804,85)	\$ (1.804,85)	\$ (1.804,85)	\$ (1.804,85)	\$ (1.804,85)
UTILIDAD OPERATIVA	\$ 231.422,96	\$ 245.798,20	\$ 260.676,57	\$ 276.075,69	\$ 292.013,78
<i>Gastos Financieros (Intereses)</i>	\$ (13.004,19)	\$ (6.876,21)			
UTILIDAD ANTES DE PARTICIPACION	\$ 218.418,77	\$ 238.921,99	\$ 260.676,57	\$ 276.075,69	\$ 292.013,78
15% TRABAJADORES	\$ (32.762,82)	\$ (35.838,30)	\$ (39.101,49)	\$ (41.411,35)	\$ (43.802,07)
UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS	\$ 185.655,96	\$ 203.083,69	\$ 221.575,09	\$ 234.664,34	\$ 248.211,7
25% IMPUESTOS	\$ (46.413,99)	\$ (50.770,92)	\$ (55.393,77)	\$ (58.666,08)	\$ (62.052,93)
UTILIDAD NETA	\$ 139.241,97	\$ 152.312,77	\$ 166.181,32	\$ 175.998,25	\$ 186.158,78
<i>Amortización Deuda</i>	\$ (63.192,39)	\$ (63.192,39)	\$ (63.192,39)	\$ (63.192,39)	\$ (63.192,39)
<i>Depreciación</i>	\$ 20.961,55	\$ 20.961,55	\$ 20.961,55	\$ 20.961,55	\$ 20.961,55
<i>Amortización de diferidos</i>	\$ 1.804,85	\$ 1.804,85	\$ 1.804,85	\$ 1.804,85	\$ 1.804,85
<i>Inversión</i>					
<i>Capital de trabajo</i>					
<i>Préstamo</i>					
<i>Valor de Liquidación de Capital de trabajo</i>					\$ (46.412,58)
<i>Reinversión de Activos Fijos</i>					
<i>Valor de desecho de Activos Fijos</i>	\$ 459,34			\$ 459,34	\$ 101.218,68
FLUJO DE CAJA NETO	\$ 99.275,32	\$ 111.886,78	\$ 125.755,33	\$ 136.031,60	\$ 200.538,90

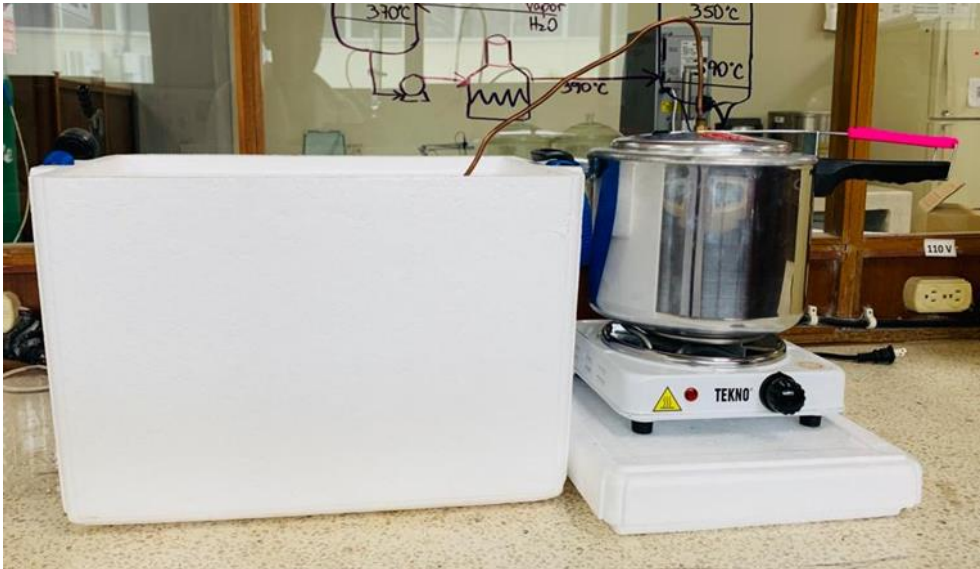
ANEXOS



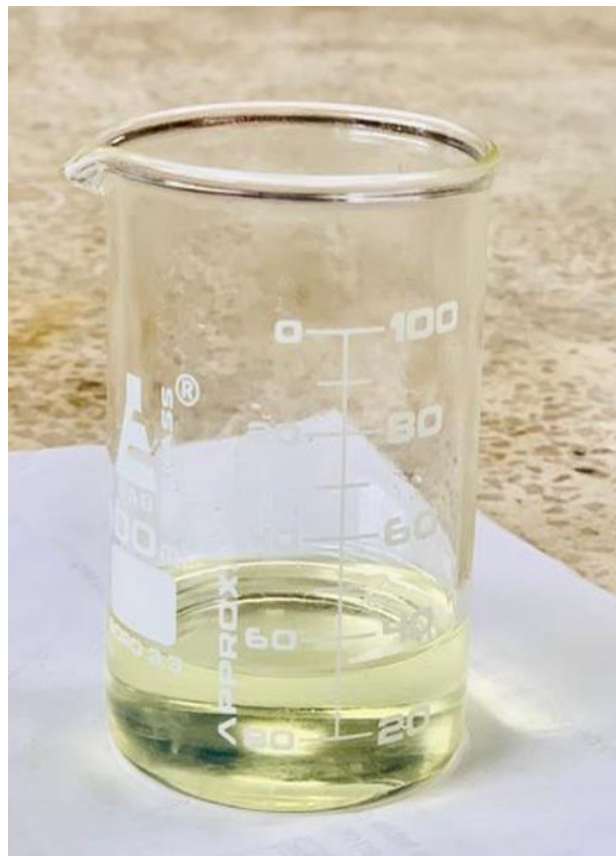
Anexo 1. Residuos plásticos post consumo de la bananera



Anexo 2. Materia prima (PEAD) triturada



Anexo 3. Vista lateral del sistema de pirólisis



Anexo 4. Producto líquido (biocombustible)



Anexo 5. Producto sólido del proceso de pirólisis



Anexo 6. Producto gaseoso del proceso de pirólisis

