

**Diseño básico de una planta piloto de pirólisis de residuos plásticos: Modelo para investigación y demostración en apoyo a la transición energética**

Juan Manuel Mogollón González y Derly Tatiana Méndez Hernández

Director

Giovanni Morales Medina

Prof. Escuela de Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Ingeniería Química

Bucaramanga

2025

## Tabla de Contenido

Introducción.....	11
1. Objetivos.....	12
Objetivo General.....	12
Objetivos Específicos .....	12
2. Marco conceptual.....	12
3. Metodología.....	20
Fase I: Diseño conceptual.....	20
Fase II: Diseño básico del proceso. ....	21
Fase III: Evaluación financiera.....	22
4. Resultados y Análisis de Resultados.....	24
4.1 Diseño conceptual.....	24
4.1.1 <i>Problema de diseño</i> .....	24
4.1.2 <i>Limitaciones y restricciones</i> .....	24
4.1.3 <i>Alternativas de diseño</i> .....	25
4.1.3 <i>Cinética y Análisis TGA</i> .....	28
4.2 Diseño básico.....	31
4.2.1. <i>Diagrama PFD y simulación</i> .....	31
4.2.2. <i>Análisis de seguridad HAZOP</i> .....	35
4.2.4. <i>Esquema de control – P&amp;ID</i> .....	39
4.2.5. <i>Distribución espacial de los equipos y vista isométrica</i> .....	41
4.3 Evaluación financiera .....	43

4.3.1. <i>Estimación de los costos de capital (CAPEX)</i> .....	43
4.3.2. <i>Estimación de los costos de operación (OPEX)</i> .....	44
4.3.3. <i>Flujos de caja e indicadores financieros</i> .....	45
4.3.4. <i>Análisis de sensibilidad</i> .....	46
4.4 Comentarios finales .....	47
5. Conclusiones.....	48
6. Recomendaciones .....	49
Referencias .....	50

### Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Metodología .....	23
<b>Figura 2.</b> Termogramas obtenidos por análisis TGA.....	28
<b>Figura 3.</b> Linealización de la tasa de calentamiento respecto a la temperatura, a diferentes tasas de conversión. ....	29
<b>Figura 4.</b> Curva cinética del proceso de pirólisis de plásticos.....	31
<b>Figura 5.</b> Diagrama PFD de la planta de pirólisis de residuos plásticos. ....	32
<b>Figura 6.</b> Simulación en Aspen Plus del proceso de pirólisis de plásticos. ....	33
<b>Figura 7.</b> Diagrama P&ID con alarmas. ....	40
<b>Figura 8.</b> Plot Plan de la planta de pirólisis de residuos plásticos.....	42
<b>Figura 9.</b> Diagrama isométrico de la planta piloto. ....	43
<b>Figura 10.</b> Flujos de caja durante el horizonte del proyecto .....	46
<b>Figura 11.</b> Diagrama de entradas y salidas .....	58
<b>Figura 12.</b> Análisis DOFA de las limitaciones y restricciones del proceso .....	72

**Lista de tablas**

<b>Tabla 1.</b> <i>Técnicas para el tratamiento de plásticos.</i> .....	16
<b>Tabla 2.</b> <i>Comparación cualitativa entre diferentes características de los reactores utilizados en pirólisis</i> .....	18
<b>Tabla 3.</b> <i>Condiciones de operación requeridas respecto a cada tipo de plástico</i> .....	19
<b>Tabla 4.</b> <i>Limitaciones y restricciones para el proceso de pirólisis</i> .....	25
<b>Tabla 5.</b> <i>Alternativas de diseño del proceso de pirólisis</i> .....	25
<b>Tabla 6.</b> <i>Alternativas de separación de residuos sólidos</i> .....	27
<b>Tabla 7.</b> Datos de linealización de $\beta$ respecto a la temperatura .....	29
<b>Tabla 8.</b> <i>Energías de activación para cada tasa de conversión.</i> .....	30
<b>Tabla 9.</b> Equipos de la planta de pirólisis .....	33
<b>Tabla 10.</b> Sistema de tuberías de la planta de proceso.....	35
<b>Tabla 11.</b> Análisis de seguridad HAZOP .....	37
<b>Tabla 12.</b> Definición del sistema de alarmas de la planta de proceso.....	39
<b>Tabla 13.</b> Descripción del sistema de control establecido para el proceso. ....	41
<b>Tabla 14.</b> Costos fijos de la planta de procesamiento. ....	44
<b>Tabla 15.</b> Costos de operación .....	45
<b>Tabla 16.</b> Corrientes del proceso de pirólisis de residuos plásticos.....	59
<b>Tabla 17.</b> Códigos de destino del proceso de pirólisis.....	60
<b>Tabla 18.</b> <i>Costos de capital de la planta de procesamiento de residuos plásticos.</i> .....	61
<b>Tabla 19.</b> Costos de materias primas .....	62
<b>Tabla 20.</b> Costos de servicios industriales .....	62

<b>Tabla 21.</b> Energía producida por la planta piloto .....	62
<b>Tabla 22.</b> Costos de inversión .....	62
<b>Tabla 23.</b> Flujos de caja del proceso. ....	63
<b>Tabla 24.</b> <i>Criterios financieros</i> .....	61
<b>Tabla 25.</b> Análisis de sensibilidad con escenario negativo .....	64
<b>Tabla 26.</b> Análisis de sensibilidad con escenario positivo. ....	65
<b>Tabla 27.</b> Especificaciones del tanque de almacenamiento T101 .....	66
<b>Tabla 28.</b> <i>Especificaciones del tanque de almacenamiento T102</i> .....	66
<b>Tabla 29.</b> <i>Especificaciones del tanque de almacenamiento T103</i> .....	67
<b>Tabla 30.</b> <i>Especificaciones del tanque de almacenamiento T104</i> .....	67
<b>Tabla 31.</b> Especificaciones intercambiador de calor HE101 .....	68
<b>Tabla 32.</b> <i>Especificaciones del separador flash FS101</i> .....	68
<b>Tabla 33.</b> Especificaciones soplador B101 .....	69
<b>Tabla 34.</b> <i>Especificaciones del soplador B102</i> .....	69
<b>Tabla 35.</b> <i>Especificaciones de la cinta de transporte CB101</i> .....	70
<b>Tabla 36.</b> <i>Especificaciones del triturador G101</i> .....	70
<b>Tabla 37.</b> <i>Especificaciones del cilindro de nitrógeno C101</i> .....	71
<b>Tabla 38.</b> <i>Especificaciones del filtro F101</i> .....	71

**Lista de Apéndices**

Apéndice A. Ecuaciones para el cálculo de la cinética de reacción.....	56
Apéndice B. Código para la determinación del modelo cinético.....	57
Apéndice C. Corrientes del proceso .....	59
Apéndice D. Cálculos financieros .....	61
Apéndice E. Hojas de especificaciones de los equipos.....	66
Apéndice F. Análisis DOFA.....	72

**Lista de siglas**

HDPE: Polietileno de Alta Densidad

LDPE: Polietileno de Baja Densidad

PET: Tereftalato de Polietileno

PP: Polipropileno

PVC: Policloruro de Vinilo

PS: Poliestireno

ROI: Retorno sobre la Inversión

TIR: Tasa Interna de Retorno

VPN: Valor Presente Neto

AMB: Área Metropolitana de Bucaramanga

## Resumen

**Título:** Diseño básico de una planta piloto de pirólisis de residuos plásticos: Modelo para investigación y demostración en apoyo a la transición energética\*

**Autores:** Juan Manuel Mogollón González, Derly Tatiana Méndez Hernández\*\*

**Palabras clave:** Pirólisis, residuos plásticos, transición energética, diseño de planta piloto, evaluación financiera, combustibles.

**Descripción:** El presente trabajo tiene como objetivo principal diseñar una planta piloto de pirólisis para el tratamiento de residuos plásticos, contribuyendo a la transición energética y la reducción de desechos. Se plantean objetivos específicos que incluyen el desarrollo de un diseño conceptual, la creación de un diseño básico que contemple aspectos energéticos y de seguridad, y la evaluación financiera del proyecto utilizando indicadores como VPN, TIR y ROI. La metodología se divide en tres fases: diseño conceptual, diseño básico del proceso y evaluación financiera.

Los resultados indican que la pirólisis es una alternativa viable para convertir residuos plásticos en combustibles y generación de energía; reduciendo así la huella de carbono entre un 15% y 60% en comparación con la incineración. La evaluación financiera revela que el VPN es de \$ 45,494.55 USD y la Tasa Interna de Retorno se estima en 21.09%, lo que sugiere que la planta piloto es económicamente viable a largo plazo.

Se resalta la importancia de implementar tecnologías de pirólisis como parte de una estrategia más amplia para gestionar residuos plásticos y apoyar la transición hacia energías más limpias. Se recomienda realizar el proceso de diseño utilizando una muestra más homogénea de plásticos para optimizar el rendimiento y reducir costos operativos. Además, se sugiere llevar el diseño conceptual a una fase experimental para validar su adecuación y viabilidad, evaluando las condiciones reales del proceso y asegurando una gestión eficiente de los residuos plásticos.

\*Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Giovanni Morales Medina

## Summary

**Title:** Basic Design of a Plastic Waste Pyrolysis Pilot Plant: A Model for Research and Demonstration in Support of Energy Transition

**Authors:** Juan Manuel Mogollón González, Derly Tatiana Méndez Hernández

**Keywords:** Pyrolysis, plastic waste, energy transition, pilot plant design, financial evaluation, fuels.

**Description:** The main objective of this work is to design a pyrolysis pilot plant for the treatment of plastic waste, contributing to the energy transition and waste reduction. Specific objectives include developing a conceptual design, creating a basic design that considers energy and safety aspects, and conducting a financial evaluation of the project using indicators such as NPV, IRR, and ROI. The methodology is divided into three phases: conceptual design, basic process design, and financial evaluation.

The results indicate that pyrolysis is a viable alternative for converting plastic waste into fuels and energy generation; thus, reducing the carbon footprint by 15% to 60% compared to incineration. The financial evaluation reveals that the NPV is \$45,494.55 USD and the Internal Rate of Return is estimated at 21.09%, suggesting that the pilot plant is economically viable in the long term.

The importance of implementing pyrolysis technologies as part of a broader strategy to manage plastic waste and support the transition to cleaner energies is emphasized. It is recommended to conduct the design process using a more homogeneous sample of plastics to optimize performance and reduce operational costs. Additionally, it is suggested to advance the conceptual design to an experimental phase to validate its suitability and feasibility, evaluating real process conditions and ensuring efficient management of plastic waste.

\*Bachelor Thesis

\*\*Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director Giovanni Morales Medina

## Introducción

A nivel mundial se ha propuesto la meta de una transición energética hacia un escenario de cero emisiones, lo que ha motivado la aplicación de tecnologías de conversión de combustibles alternativos (International Energy Agency, 2023). Una de estas tecnologías es la pirólisis, la cual puede transformar material plástico en combustibles como gasolina y diésel. La pirólisis se presenta como una alternativa para la gran cantidad de desechos plásticos generados anualmente. Un ejemplo de la problemática actual de residuos plásticos es el vórtice de basura del Océano Pacífico, un enorme cúmulo de desechos plásticos de un área de 20 millones de km<sup>2</sup>.

(La Gran Mancha de Basura Del Pacífico, 2024; Eriksen et al., 2014) que, al descomponerse, libera sustancias químicas tóxicas al medio ambiente degradando la vida silvestre y acuática (Gupta & Dash, 2023). En tierra, la acumulación de plásticos ha traído problemas sanitarios, ambientales y de carácter socioeconómico; esta acumulación conduce a la pérdida de productividad del suelo, la presencia de plagas, afectaciones al aire, contribución al efecto invernadero y daños a fuentes hídricas (Ministerio Del Ambiente, 2019).

La pirólisis puede valorizar una gran cantidad de residuos plásticos, generando combustibles y materias primas utilizadas en la industria petroquímica y a su vez reduciendo en un 15-60% la huella de carbono, comparado con la incineración (Qureshi, 2020). Sin embargo, la aplicación de esta tecnología requiere de investigaciones adicionales que definan las condiciones operacionales según el material plástico procesado (Ángel et al., 2023). En este contexto, una planta piloto que contemple tanto la investigación como la demostración de la tecnología de pirólisis de residuos plásticos correspondería a un apoyo a la transición energética.

Dado lo anterior, en el presente documento se describe un diseño básico de una planta piloto de pirólisis de residuos plásticos, en apoyo a la investigación y a la transición energética. Como potencial aplicación de los resultados derivados del presente documento se tendría una planta piloto para el análisis de la cinética de la pirólisis y la optimización del proceso. La pregunta de investigación definida en el desarrollo del trabajo correspondió a,

¿cuáles son los parámetros de diseño para una planta piloto que procese la cantidad de plásticos requerida en investigación y demostración del proceso de pirólisis?

## 1. Objetivos

### Objetivo General

Diseñar en un nivel básico de ingeniería una planta piloto de pirólisis de residuos plásticos de utilidad en la investigación y demostración en apoyo al tema de la transición energética.

### Objetivos Específicos

- Desarrollar un diseño conceptual de una planta piloto de pirólisis de residuos plásticos mediante la descripción del problema de diseño, las limitaciones y restricciones del sistema, las alternativas de solución y la selección de la alternativa más adecuada.
- Establecer un diseño básico de la planta piloto de pirólisis de residuos plásticos, mediante la estimación de los consumos energéticos, la proposición de un esquema de control, la definición de una distribución espacial de los equipos y la aplicación de las normas de seguridad industrial.
- Evaluar financieramente la construcción y operación de la planta, por medio los indicadores VPN, TIR y ROI obtenidos de un flujo de caja a 20 años, estableciendo la viabilidad de la tecnología de pirólisis de residuos plásticos a nivel piloto demostrativo, como apoyo a la transición energética.

## 2. Marco conceptual

La pirólisis es un proceso a altas temperaturas que genera una descomposición térmica de materiales orgánicos en productos gaseosos, líquidos y sólidos, en ausencia de oxígeno o con un suministro limitado de oxígeno. Estos productos pueden usarse como combustibles y su rendimiento varía en función del tipo de plástico usado y de las condiciones operativas en las que se hayan producido. En el diagrama de la Figura 1, se ilustra el proceso de pirólisis de plásticos, donde parte de la corriente de salida del reactor de pirólisis se lleva a un condensador para producir un combustible líquido y también se obtiene gas de síntesis y residuos sólidos como el carbón. Los productos de la pirólisis dependen del tipo de plástico,

sin embargo, en la mayoría se reportan hidrocarburos del C<sub>4</sub> al C<sub>13</sub>, carbón, así como los productos aromáticos benceno, tolueno, difenil, xileno y estireno (Rodríguez Mendoza, 2015).

El proceso de pirólisis de residuos plásticos ha sido investigado durante varios años, considerándose como una alternativa viable en el contexto de la gestión de residuos y la reducción de contaminantes asociados a estos residuos (Rodríguez Mendoza, 2015). Debido a esto, se han investigado múltiples alternativas para este proceso, como lo es el uso de un reactor *Batch* de pirólisis térmica según lo propuesto por Jordán Morales & Zurita Garcés (2018), quienes construyeron el equipo para el proceso capaz de trabajar hasta una temperatura de 700 °C y una presión máxima de 120 psi, con extensiones adaptables a un sistema de condensación capaz de recuperar hidrocarburos de bajo peso molecular y de fácil muestreo de la fracción gaseosa. Su validación se realizó utilizando polipropileno reciclado y determinando el rango de temperatura para este tipo de plástico entre 350 y 450 °C donde se obtuvo la mayor fracción líquida con un porcentaje en peso del 51.1 % constituida por una mezcla de hidrocarburos comprendidos a su vez del 51 % de hidrocarburos totales C<sub>6</sub> a C<sub>12</sub> y el 32 % entre C<sub>13</sub> a C<sub>28</sub>. A pesar de que estos resultados muestran un factor favorable para la escalabilidad del proceso, es importante resaltar que se requiere investigación cambiando la configuración del proceso de un proceso por lotes a uno continuo.

Por otra parte, Gala et al. (2021) propusieron una optimización para la pirólisis de plásticos por medio de la implementación de un reactor de hidrogenación catalítica. Los autores consideraron aspectos como el flujo, las reacciones de hidrogenación de olefinas, la difusión y la transferencia de calor. Además, Gala et al. aplicaron un análisis de sensibilidad para evaluar la influencia del tiempo espacial, la transferencia de calor y el flujo de H<sub>2</sub>. Los autores concluyeron que, el aceite refrigerante permite mitigar posibles gradientes de temperatura derivados de la reacción exotérmica de hidrogenación. También, el consumo de la energía puede ser minimizada ajustando la temperatura de entrada del H<sub>2</sub> y el flujo de aceite refrigerante. Asimismo, el uso de reactores tipo *Batch* o *semi-Batch* presenta desventajas operativas en la pirólisis catalítica debido al potencial de formación de coque en la superficie externa del catalizador.

Si bien Gala et al. resaltan la importancia de la selección del reactor en el proceso de pirólisis, en la degradación térmica de los plásticos, la temperatura es uno de los parámetros operativos más significativos en la pirólisis, ya que controla la reacción de craqueo de la cadena polimérica (Sharuddin et al., 2018). Diferentes plásticos tienen diferentes temperaturas de degradación dependiendo de su estructura química. Para plásticos comunes como PET, HDPE, LDPE, PP y PS, la temperatura de degradación térmica comienza a 350°C, excepto para el PVC, cuya degradación comienza a una temperatura más baja de 220°C. Además, la temperatura operativa requerida depende en gran medida de la preferencia del producto. Si se prefiere un producto gaseoso o de carbón, se sugiere una temperatura más alta, superior a 500°C. Si se prefiere un producto líquido, se recomienda una temperatura más baja en el rango de 300-500°C, y esta condición es aplicable para todos los plásticos.

En Colombia, la transición energética y el desarrollo de procesos como la pirólisis de residuos plásticos se han ido incorporando de forma gradual en las políticas gubernamentales, de tal forma que se han implementado medidas en su actual Plan de Gestión para los Plásticos de un solo uso (Ministerio Ambiente y Desarrollo sostenible Colombia, 2021). El objetivo corresponde a que al año 2030 se tenga un porcentaje de aprovechamiento de plásticos del 90% en el sector de la construcción y de un 30% en el resto de los sectores económicos que utilicen este tipo de materia. Así mismo, leyes como la Ley 1715 de 2014 y la Ley 2099 de 2021, promueven el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía mediante su integración al mercado, su participación en las zonas no interconectadas y en otros usos para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad y gestión eficiente del abastecimiento energético (Mesa Puyo, 2021). Estas leyes establecen unos incentivos tributarios en apoyo al desarrollo de proyectos dirigidos a la generación eléctrica, los cuales pueden ser aplicados en la evaluación financiera de la planta piloto propuesta en el presente documento. Estos incentivos son depreciación acelerada de los equipos, exención de IVA y aranceles en equipos y servicios, reducción del impuesto de renta y devolución de hasta el 50% del presupuesto de inversión (Mesa Puyo, 2021).

Una de las ventajas más importantes de la pirólisis frente a otras tecnologías es su capacidad para procesar una amplia gama de materias primas, incluidos diversos tipos de

residuos plásticos; la Tabla 1 compara las tecnologías de tratamiento químico de residuos plásticos. Además, el proceso de pirólisis convierte materiales orgánicos complejos en productos valiosos, como aceite líquido, gases y carbón vegetal. Estos productos no solo pueden utilizarse para generar energía, sino que también sirven como materia prima para productos de mayor valor y utilidad (Al-Salem, 2018). En términos de impacto ambiental, la pirólisis suele ser más favorable que la incineración, ya que produce menos emisiones de gases de efecto invernadero. Al operar en un entorno sin oxígeno, se minimiza la formación de subproductos nocivos, contribuyendo así a la reducción de emisiones contaminantes. Además, la pirólisis también es eficaz en la reducción del volumen de residuos sin requerir el uso de altas presiones y temperatura con en la hidrogenación. Al convertir los residuos en productos útiles, se minimiza la cantidad de material que termina en los vertederos, contribuyendo a una gestión de residuos más sostenible y eficiente. También, con un costo de capital que oscila entre \$17 y \$25 usd/t y un OPEX entre \$2 y \$3 usd/t, la pirólisis es más asequible en comparación con otros métodos como la incineración y la gasificación por arco de plasma (Rehan et al., 2017).

La reacción de pirólisis puede ser realizada en múltiples tipos de reactores, como: reactores tubulares (Miskolczi et al., 2009a), hornos rotarios (Li et al., 1999), de microondas (Undri et al., 2013), semicontinuos (López et al., 2011a), *batch* o discontinuo (Syamsiro et al., 2014). De estos, tanto los reactores discontinuos como los semicontinuos se utilizan ampliamente en laboratorios debido a su operación sencilla, diseño simple y ventajas desde el punto de vista de la seguridad (Almeida & De Fátima Marques, 2016). Por su parte, en la producción de combustible o monómeros, se emplean reactores piloto continuos, como los reactores de lecho fluidizado y lecho empacado, con alimentación continua de plástico (Artetxe et al., 2012). De otro lado, los reactores de lecho fluidizado, de lecho transportado, lecho fluido circulante, vórtice y pala giratoria, cono giratorio y cono vacío requieren menor energía para descomponer los plásticos, reducen el tamaño y el contenido de humedad (Bridgwater & Peacocke, 2000).

**Tabla 1**

*Técnicas para el tratamiento de plásticos.*

Técnica	Pirólisis	Gasificación	Hidrogenación	Incineración
Definición	Degradación térmica de plásticos en presencia de calor y atmósfera inerte	Tratamiento de desechos sólidos en ausencia de oxígeno (oxidación parcial para la producción de combustibles o gas de síntesis)	Tratamiento de productos plásticos a alta presión con hidrógeno, para obtener aceite de crudo de alta calidad	Quema de plásticos con aire en exceso para la obtención de energía en forma de trabajo y calor
Condiciones de operación	Presiones ligeramente superiores a la atmosférica. Temperaturas 500-800 °C	Presión atmosférica. Temperatura 850-1200 °C	Presión 100 bar. Temperaturas 350-490 °C	Presión atmosférica. Temperatura 850-1200 °C
Contaminantes producidos	Brea, H <sub>2</sub> S y HCl	Brea, H <sub>2</sub> S y HCl	HCl y residuos	SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> y dioxinas
Productos principales	CO, H <sub>2</sub> e Hidrocarburos	Syngas, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O y CH <sub>4</sub>	Syncrudes y gas natural equivalente	Energía, CO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> O a altas temperaturas
Características	<p>El proceso genera mayor cantidad de productos gaseosos y líquidos que productos sólidos.</p> <p>Produce sólidos que pueden ser capitalizados como carbón combustible.</p> <p>El aceite generado puede utilizarse directamente como combustible.</p> <p>El carbón sólido también puede mejorarse para convertirlo en carbón activado.</p>	<p>Los residuos del proceso, como cenizas y escoria, pueden reciclarse como agregados para la construcción.</p> <p>Se realiza un lavado para eliminar partículas y contaminantes.</p> <p>El gas de síntesis se utiliza como materia prima en motores para generar calor y electricidad, así como en combustibles de hidrógeno para vehículos.</p>	<p>El proceso acepta PVC y lo convierte en HCl.</p> <p>La viscoreducción se aplica típicamente como un proceso de pretratamiento, antes de la hidrogenación.</p>	<p>Los gases se purifican con un sistema de control de contaminación en la chimenea, utilizando técnicas como la combustión en lecho fluidizado, rejilla móvil y horno rotatorio.</p> <p>La ceniza de fondo se puede procesar para recuperar metales, pero los productos de incineración no suelen aprovecharse químicamente, aunque es posible generar metano y metanol a partir de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>.</p>

*Nota:* Adaptado de Al-Salem (2018)

Los rendimientos del proceso de pirólisis dependen del desarrollo de factores como el tipo de reactor, la reacción de descomposición ya sea térmica o catalíticamente. Para ello se emplean distintos tipos de catalizador y variaciones en el tiempo de residencia. Este último factor corresponde al de mayor influencia en el rendimiento de líquidos, ya que a mayor tiempo de craqueo térmico mayor frecuencia de rompimiento de enlaces C-C, con el respectivo aumento en el rendimiento de gases (Dai et al., 2022; Anene et al., 2018). Lo anterior justifica la selección del tipo de reactor que se debe usar y las ventajas que poseen frente a sus competidores.

Los reactores *batch* son económicos y de fácil construcción, pero limitados por su baja capacidad de carga y tiempos de operación prolongados, lo que genera una eficiencia del 65% y un balance energético positivo (+700 kJ/kg) en condiciones específicas (Dai et al., 2022; López de Marco et al., 2011). En contraste, el reactor de horno de tornillo rotatorio permite una mejor transferencia de calor y limpieza, aunque puede enfrentar obstrucciones a gran escala, produciendo más ceras que líquidos combustibles (Campuzano et al., 2019). Este reactor ha tratado plástico a 500 °C con una capacidad de 300 g/h en tan solo 15 s.

El reactor de lecho fluidizado, popular en pirólisis, destaca por su alta eficiencia en la transferencia de masa y energía, aunque requiere grandes volúmenes de gas y presenta problemas de desfluidización, además de ser costoso. Con este reactor se han logrado eficiencias del 40.1% a 500 °C y tiempos de residencia de 1.3-1.7; sin embargo, tiende a un mayor rendimiento de gases que de líquidos (del Remedio Hernández et al., 2007).

El reactor empacado de pico cónico, similar al de lecho empacado, se caracteriza por un corto tiempo de residencia, pero su uso se ve limitado por el tamaño de partícula y la circulación del catalizador. En escalas pequeñas, el reactor cónico ha mostrado un rendimiento del 69% en ceras con una capacidad calorífica de 35.55 MJ/kg (Arabiourrutia et al., 2012; Artetxe et al., 2015). Por su parte, los reactores de microondas, aunque rápidos y selectivos, tienen una capacidad limitada y sus eficiencias dependen de las propiedades dieléctricas de los plásticos. Con estos reactores se han reportado rendimientos del 33% de aceites líquidos y 41% de ceras con tiempos de 90 s a 500 °C (Foong et al., 2020; Dai et al., 2022). De otro lado, el reactor de sales fundidas, menos utilizado por su alto costo, ofrece un

elevado rendimiento (91.31%) sin necesidad de pretratamiento de plásticos (Stelmachowski, 2010; 2014; Dai et al., 2022).

Las características de los reactores anteriores son comparadas en la tabla 2, mediante los criterios alto, medio y bajo, donde bajo, corresponde por debajo de la media; medio es el estándar; y alto es que presenta características superiores a los demás. Estos criterios fueron adoptados por una escala realizada considerando lo definido en los documentos citados en la columna “Citas”. Según lo anterior, los reactores de lecho fluidizado y el reactor de tornillo son los más adecuados para la operación debido a su factor alto en características como su eficiencia de calentamiento y simplicidad de la operación.

**Tabla 2**

*Comparación cualitativa entre diferentes características de los reactores utilizados en pirólisis*

Reactor/Característica	Batch	Tornillo	Fluidizado	Empacado	Microondas	Citas
Costos de Operación	Bajo	Medio	Medio	Medio	Alto	(Dai et al.,2022; López de Marco et al.,2011)
Facilidad de Escalabilidad	Alto	Medio	Alto	Bajo	Bajo	(Campuzano et al., 2019; Artetxe et al., 2015).
Eficiencia de calentamiento	Medio	Alto	Alto	Alto	Medio	(del Remedio Hernández et al., 2007; Foong et al., 2020)
Simplicidad de operación	Bajo	Alto	Alto	Alto	Bajo	(Stelmachowski, 2010; Stelmachowski, 2014)

*Nota.* Se compararon los distintos reactores para el proceso de pirólisis y se categorizando en 3 escalas alto, medio y bajo de acuerdo con las características de costos, escalabilidad, calentamiento y operación.

En la operación del reactor, la temperatura y el tiempo de residencia definen la extensión de la reacción de craqueo del plástico (Diaz Silvarrey & Phan, 2016). El aumento progresivo de la temperatura favorece la producción de gases en lugar de combustibles líquidos y la concentración de H<sub>2</sub> en el gas producido (Diaz Silvarrey & Phan, 2016). Onwudili et al. (2019) encontraron que al aumentar la temperatura en procesos catalizados de entre 430 a 571 °C, la producción de alcanos lineales en el rango de C8-C16, así como para la producción de aromáticos aumentaban aproximadamente un 20%. Además, al incrementar la temperatura del lecho catalítico de 500 a 600 °C se observó un aumento en la producción de gases, principalmente hidrocarburos C1-C4.

Respecto a los catalizadores, el catalizador sólido o heterogéneo facilita la recuperación del catalizador en contacto directo (Aisien & Aisien, 2023). En comparación con la reacción de pirólisis en fase de vapor, la pirólisis catalítica por contacto directo ofrece una mejor distribución del producto. En la distribución de productos de cualquier pirólisis catalítica, la acidez del catalizador favorece el rendimiento de la fracción gaseosa, reduciendo el rendimiento de la fracción líquida (Akin et al., 2023)2023); ejemplo de estos catalizadores son el FCC gastado y la zeolita, comúnmente utilizados en refinerías de petróleo y en la copirólisis del carbón. Por su parte, los catalizadores básicos (MCM-41 y óxidos de silicio con aluminio) favorecen la generación de combustibles líquidos (Manos et al., 2000; López et al., 2017).

Los rendimientos de productos se ven mayormente influenciados por el tipo de plástico utilizado en la pirólisis. En la Tabla 3 se describen los cinco tipos de plásticos (Buekens, 2006) más usados a nivel mundial, los rendimientos a productos líquidos y las condiciones requeridas para su adecuado tratamiento mediante pirólisis.

**Tabla 3**

*Condiciones de operación requeridas respecto a cada tipo de plástico.*

Plástico	T [°C]	Conversión % p/p	Rendimiento de líquidos sin catalizador %p/p	Rendimiento de líquidos con catalizador %p/p	Atm. Inerte	Citas
PE	250-760	90-95	83.7-92.3	88.8	N <sub>2</sub> o Ar	(Camacho Flórez & Arciniegas Hernández, 2024)(Xayachak et al., 2022a)(Miandad et al., 2019)(Kassargy et al., 2018)
PP	200-500	95-98	83.7-88.8	91.7	N <sub>2</sub>	(Xayachak et al., 2022b)(Miandad et al., 2019)(Kassargy et al., 2018)(Frączak et al., 2021)
PVC	200-400	80-90	28.3-31.7	59.3-64.38	N <sub>2</sub>	(Zevenhoven et al., 2002)(Tang et al., 2003)(Frączak et al., 2021)
PS	300-475	95-98	26.3-99.7	52	N <sub>2</sub>	(Miandad et al., 2019)(Miandad et al., 2016)(Frączak et al., 2021)
PET	300-700	45	9.1	1.1-5.3	N <sub>2</sub>	(Buekens, 2006)(Dzięcioł & Trzeszczyński, 2000)(Williams 1999)(López et al., 2011b)

*Nota:* La tabla describe los 5 tipos de plásticos más usados a nivel mundial junto con sus requerimientos de operación y rendimientos en un proceso de pirólisis.

### 3. Metodología

#### Fase I: Diseño conceptual.

Actividad 1. Búsqueda de información respecto al proceso de pirólisis orientado a tipos de plásticos utilizados en la industria, utilizando las palabras claves “Pirólisis”, “Residuos plásticos”, y “Combustibles” con el uso de bases de datos documentales.

Actividad 2. Filtro y selección de la información recopilada en un rango de plásticos para la operación de la planta piloto de acuerdo con las características plásticos tales como: composición, uso a nivel nacional, rendimientos de pirólisis, hoja de seguridad, facilidad de reciclaje, capacidad calorífica, entre otros.

Actividad 3. Definición del problema de diseño asociado a los objetivos del proyecto mediante la selección del tamaño, producción, recurso de materia prima, calidad de los productos, mercado objetivo, rendimiento, catalizador y sistema reactivo para un sistema de producción.

Actividad 4. Definición de las limitaciones y restricciones técnicas, ambientales, sociales, operaciones, entre otras acordes con los objetivos y el problema de diseño.

Actividad 5. Planteamiento de alternativas de solución al diseño propuesto con su diagrama BFD respectivo.

Actividad 6. Caracterización y evaluación de los criterios de selección de cada alternativa mediante rendimientos, eficiencia energética, seguridad industrial e indicadores económicos como el potencial económico 3.

Actividad 7. Selección de la mejor alternativa al problema de diseño, considerando los rangos de rendimientos y los consumos energéticos.

Actividad 8. Determinación de la cinética del proceso con base en un análisis termogravimétrico (TGA) de una muestra representativa del AMB. Esta muestra se realizó con base a un análisis reportado por Panqueva (2024) con una composición de: 15,79% son envases de PET, el 10,89% PEAD, el 4,59% PVC, el 38,59% PEBD, el 16,69% PS, el resto

son otros plásticos y algunas partes del PP. Para la determinación de los parámetros cinéticos se siguió el procedimiento postulado por Peng et al. (2020) explicado en el Anexo 1.

### **Fase II: Diseño básico del proceso.**

Actividad 1. Codificación del PFD y aplicación de los balances de masa y de energía mediante simulación en el programa comercial Aspen Plus. Para el desarrollo de la simulación se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones de diseño:

- Se propone un diseño de doble reactor para el tratamiento de los residuos plásticos (PP, PS, PE y PET). Sin embargo, para la simulación del proceso y las estimaciones financieras se desarrollaron los cálculos del proceso únicamente para el reactor de tornillo rotatorio ya que solo se contaba con la información correspondiente para simular el proceso con este reactor para la muestra de plásticos.
- La simulación desarrollada en Aspen Plus uso un reactor de conversión que tomaba los datos de conversión para sólidos, líquidos y gases reportados por Miandad et al. (2017).
- La cinética que se calcula en el proceso no es usada dentro de la simulación ya que el análisis termogravimétrico no identifica que tipo de compuestos se generan en el proceso de pirólisis. Esta, se utiliza para calcular las dimensiones de los reactores.

Actividad 2. Dimensionamiento de los equipos de proceso mediante métodos *shortcut* y heurísticas de diseño y diligenciamiento de las hojas de especificaciones.

Actividad 3. Evaluación del requerimiento de servicios industriales y aplicación de la integración energética.

Actividad 4. Establecimiento de los sistemas de control y diseño del tablero de control.

Actividad 5. Análisis de la distribución de equipos (*Layout*), planos Plot Plan e isométrico y estimación de requerimientos de tuberías y accesorios, utilizando AutoCAD.

Actividad 6. Análisis de seguridad y aplicación del método HAZOP

**Fase III: Evaluación financiera.**

Actividad 1. Estimación de los costos de capital (CAPEX) y costos operativos (OPEX) del proceso. Para esto se utilizará un método como el de Guthrie o la Curva de Costos.

Actividad 2. Proposición de un flujo de caja a 20 años, considerando la inflación promedio de los últimos 5 años, los incentivos tributarios, la amortización de los préstamos y demás aspectos relevantes de la proyección.

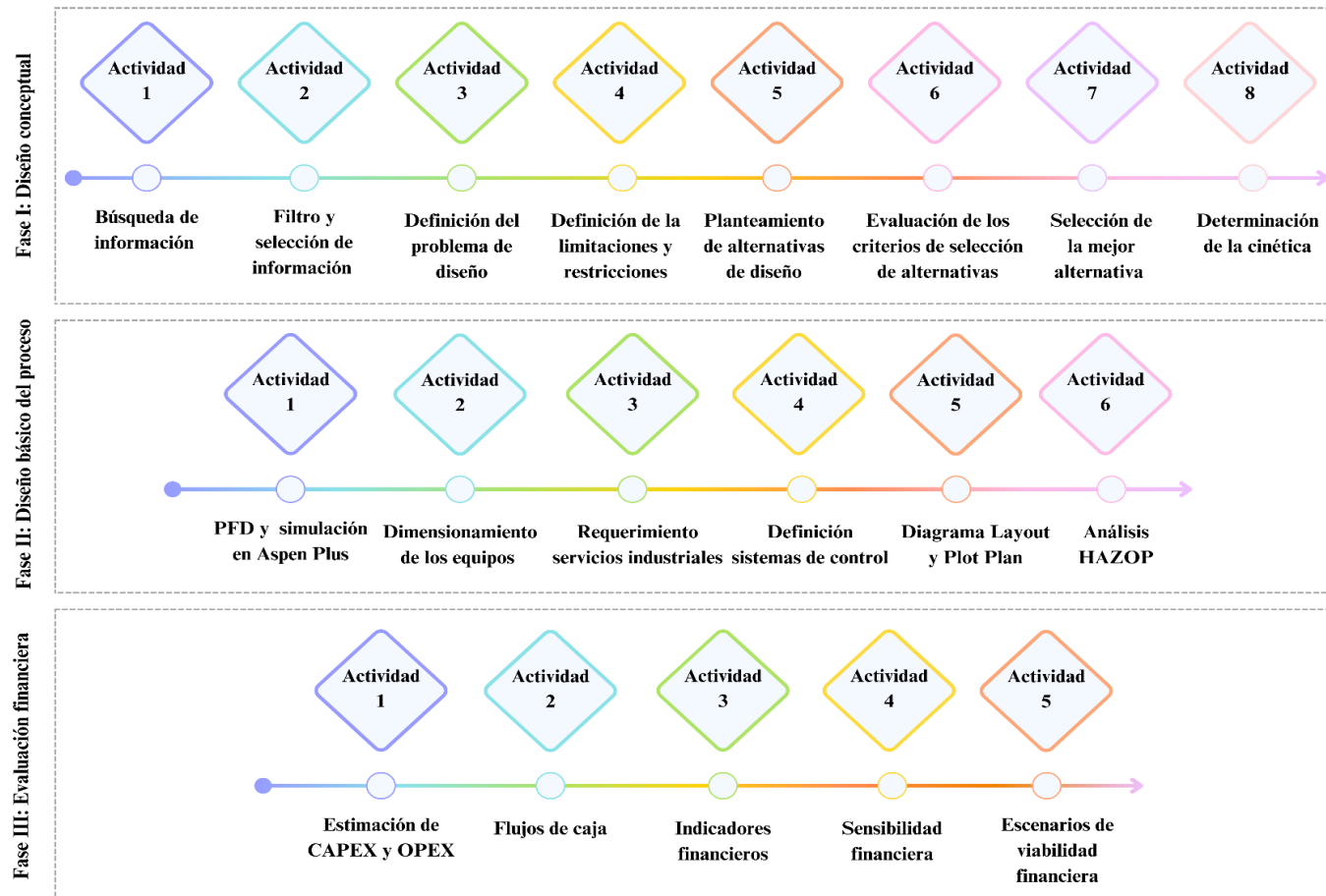
Actividad 3. Estimación de los indicadores financieros, VPN, TIR y ROI a partir del flujo de caja propuesto.

Actividad 4. Análisis de sensibilidad financiera por variación de parámetros supuestos del flujo de caja, como: inflación promedio, costos de transporte, precio de venta de productos, entre otros.

Actividad 5. Definición de escenarios de viabilidad financiera, según los resultados obtenidos en las actividades 3 y 4.

**Figura 1**

*Metodología*



*Nota.* La figura representa el paso a paso metodológico realizado para la elaboración del proyecto agrupadas en su fase respectiva.

## 4. Resultados y Análisis de Resultados

### 4.1 Diseño conceptual

#### 4.1.1 *Problema de diseño*

El objetivo del presente proyecto es diseñar una planta piloto para la pirólisis de residuos plásticos como alternativa a la producción de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica que opere 8200h/año, tenga la capacidad de tratar una muestra de 10 kg/h de residuos plásticos con el menor gasto posible en el uso de un compuesto que garantice atmósfera inerte el proceso y sea autosuficiente energéticamente. El uso de la planta piloto debe permitir demostrar la viabilidad de la tecnología permitiendo así un posterior acercamiento al nivel industrial. Además, debe garantizar movilidad y versatilidad para su transporte para la divulgación de esta tecnología. Asimismo, por la complejidad y la novedad de esta tecnología es necesario determinar los factores claves que influyen en el desempeño del proceso. Es así, que los elementos claves que regirán su diseño son determinados por la selección del tamaño de la planta, la capacidad de producción, la clasificación de materias primas, la calidad y pureza de los productos, el rendimiento, el tipo de catalizador y la definición del sistema reactivo junto con sus condiciones de operación. Finalmente, se debe garantizar la viabilidad financiera de la planta, de modo que, esta posea una eficiencia del proceso superior al 80% para la producción de compuestos aprovechables (gases y líquidos) de 4.2 kg/h y 4 kg/h, respectivamente. Estos combustibles deberán ser usados para la generación de 15.5 kWh de energía eléctrica la cual será el producto final del proceso.

#### 4.1.2 *Limitaciones y restricciones*

La tabla 4 detalla las restricciones y limitaciones del proceso de pirólisis, organizadas en cinco factores clave: técnico, ambiental, social, seguridad y económico. Cada fila identifica las restricciones específicas que pueden afectar la implementación y operación del proceso, así como las limitaciones que pueden influir en su eficacia y viabilidad.

**Tabla 4***Limitaciones y restricciones para el proceso de pirólisis.*

<b>Factor</b>	<b>Restricciones</b>	<b>Limitaciones</b>
<b>Técnico</b>	Necesidad de control preciso de temperatura y tiempo.	Eficiencia variable dependiendo del tipo de material y el tamaño de partícula.
<b>Ambiental</b>	Emisiones de gases que deben ser controladas. Impacto en el uso del suelo y recursos naturales.	Posible generación de residuos tóxicos si no se gestiona adecuadamente. Dependencia de la fuente de energía utilizada para el proceso
<b>Social</b>	Aceptación pública variable que puede generar oposición. Posibles preocupaciones sobre salud y seguridad en comunidades cercanas.	Necesidad de educación y sensibilización sobre el proceso.
<b>Seguridad</b>	Riesgos asociados con el manejo de materiales inflamables. Requerimientos de seguridad para la operación de equipos.	Necesidad de protocolos estrictos para prevenir accidentes. Potencial para explosiones si no se controla adecuadamente la presión y temperatura.
<b>Económico</b>	Costos iniciales altos para la instalación y operación.	Rentabilidad incierta dependiendo del mercado de productos derivados. Competencia con otras tecnologías de gestión de residuos más económicas.

*Nota.* Adaptado de Mejía Madrigal & Upegui, (2021)

#### 4.1.3 Alternativas de diseño

El proceso de pirólisis se compone de tres etapas fundamentales: pretratamientos, reacciones y postratamientos, que facilitan la generación de subproductos a partir de materiales plásticos. Dado que el diseño está orientado a la investigación que se llevará a cabo en la planta, se ha optado por diversificar el tratamiento de plásticos, lo que permite la obtención de múltiples productos debido a la naturaleza del proceso. En la Tabla 5 se presentan las alternativas establecidas para cada una de las etapas del proceso.

**Tabla 5***Alternativas de diseño del proceso de pirólisis.*

<b>Pretratamiento Plásticos</b>	<b>Sistema reactivo</b>	<b>Postratamiento Gas de síntesis</b>	<b>Recirculación de N<sub>2</sub></b>	
		<b>Separación sólidos</b>	<b>Separación Líquidos</b>	
Reducción de tamaño (Trituración y molienda)	Reactor de lecho fluidizado Reactor de tornillo rotatorio	Filtro Ciclón	Torre de destilación	Si
Reducción de tamaño (Trituración), secado y lavado de plásticos	Sistemas de reactores de tornillo rotatorio y lecho fluidizado	Precipitador electrostático Separadores de impacto	Separación Flash en serie	No

*Nota.* Esta tabla muestra las alternativas del proceso de pirólisis para cada una de las secciones del proceso.

El pretratamiento de los residuos plásticos antes de que se produzca la pirólisis debe garantizar que estos contengan la menor cantidad de heteroátomos o inertes para obtener productos con un alto grado de pureza y garantizar su uso posterior como bienes para otro proceso. (Sahu et al., 2014) (Miskolczi et al., 2009b) (Chen et al., 2014) recomiendan que a procesos escalables de plantas pilotos de pirólisis se desarrollen etapas de trituración, lavado y secado para garantizar la remoción de inertes u otros compuestos que generen dificultades en los postratamientos. Sin embargo, al tratarse de un diseño en escala piloto para la investigación, la adición de sistemas como el lavado y secado fueron descartados ya que generarían mayores costos de inversión y operación. De otro lado, según la tabla 2, los reactores con mejores prestaciones para el proceso corresponden al de tornillo rotatorio y de lecho fluidizado. El reactor de tornillo rotatorio pese a las ventajas mencionadas no puede trabajar con un catalizador por el daño físico que sufriría al entrar en contacto con el reactor, por lo cual, se opta por añadir posteriormente lechos catalíticos para continuar con la pirólisis de la corriente de gas de salida (Efika et al., 2012). Para utilizar los dos tipos de reactores en el proceso, se propone el diseño de ambos sistemas reactivos, donde se puede operar cada reactor independientemente (mediante un sistema de tuberías que permite el paso de la corriente a cada reactor). Además, la salida del reactor de tornillo rotatorio puede ser alimentada al reactor de lecho fluidizado para actuar como lecho catalítico y así conseguir una mayor variedad para el tratamiento del plástico, este proceso ya fue planteado por (Park et al., 2020). Por otra parte, los postratamientos del proceso deben garantizar que se separen y obtengan las materias de interés de acuerdo con las condiciones de alimentación. Esta sección se divide en dos subprocesos: la remoción de residuos sólidos y la recuperación de los gases condensables.

La remoción de residuos sólidos es determinante para evitar que en cualquiera de las corrientes de salida del proceso se tenga material particulado (normalmente como polvo o coque) que sea nocivo o que pueda dañar los equipos en los que se utilicen los productos del proceso. El reactor de tornillo rotatorio tiene la ventaja de que algunos de sus modelos disponen de la capacidad de extraer gran parte de los sólidos más pesados que se generan durante la reacción. Sin embargo, como se están trabajando con ambos reactores, sobre todo el de lecho fluidizado, se necesita una forma directa para purificar estas corrientes gaseosas.

**Tabla 6***Alternativas de separación de residuos sólidos*

Equipo	Caída de presión (bar/kPa)	Flujo de operación (m <sup>3</sup> /h)	Costo (USD)	Eficiencia de separación (%)	Rango de tamaño de partícula (µm)	Cita
<b>Filtro</b>	0.5 a 5 bar	5 a 100	\$5,000 a \$50,000	90% a 99%	0.1 a >100	(Lee et al., 2005)
<b>Ciclón</b>	0.5 a 3.0 kPa	1 a 40,000	\$500 a \$10,000	70% a 95%	10 a 100	(Sylvia et al., 2023)
<b>Precipitador electrostático</b>	1 to 5 kPa	1,000 to 200,000	\$50,000	>99%	0.01 to 100	(Shah et al., 2023)
<b>Separación por impacto</b>	0.5 a 2.0 kPa	10 a 1,000	\$1,000 a \$15,000	80% a >95%	10	(Järvinen et al., 2023)

*Nota.* La tabla muestra 4 equipos utilizados para la remoción de material sólido en el proceso de pirólisis con las características más importantes en su selección.

El proceso debe garantizar que no se filtre ningún sólido a las corrientes de salidas. Por esto, el ciclón y separador por impacto, pese a las ventajas de bajo requerimiento en mantenimiento y baja o nulo requerimiento de energía, fueron descartados por no cumplir con las necesidades de filtración. Por otro lado, el filtro y los precipitadores electrostáticos cumplen con el requerimiento para remover los sólidos arrastrados por la corriente de gases de reacción. Sin embargo, estos presentan la desventaja de necesitar bastante energía por el uso de compresores y la precipitación de electrones, respectivamente.

Finalmente se definió el equipo que permite recuperar los gases condensables de la corriente gaseosa del proceso. La primera alternativa es un sistema de separadores *flash* que recupera gases no condensables hasta una temperatura que puede ser establecida mediante una corriente de agua como servicio. Para luego, volver a bajar la temperatura hasta lograr remover la mayor parte de compuestos condensables mediante metanol como servicio (Park et al., 2020).

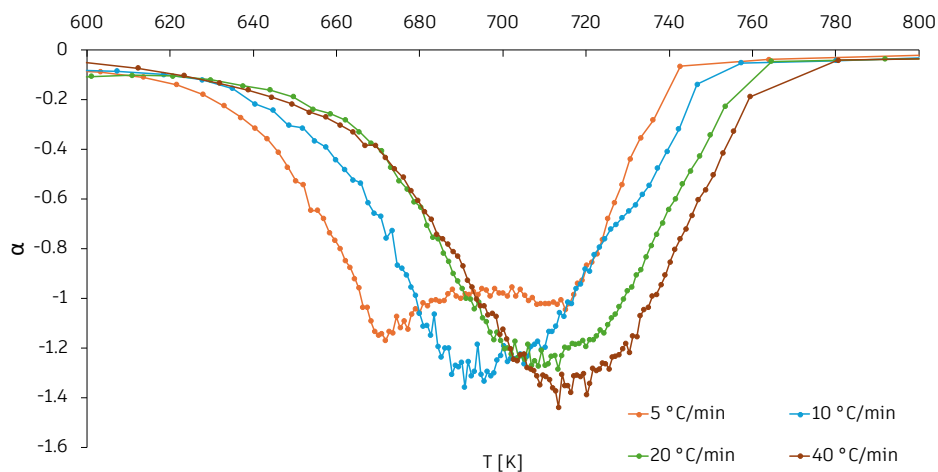
La otra opción es el uso de una torre de destilación (Miskolczi et al., 2009b). La principal ventaja que esta opción aporta al proceso radica en su capacidad para lograr múltiples separaciones de los diferentes productos generados durante la pirólisis, permitiendo que cada uno tenga un canal de salida. Sin embargo, debido a los elevados requerimientos energéticos asociados (rehervidor y condensador) y a la considerable altura necesaria para su construcción en una planta piloto, se optó por el uso del separador flash como equipo de separación.

### 4.1.3 Cinética y Análisis TGA

La figura 2 presenta los termogramas correspondientes a diferentes tasas de calentamiento: 5, 10, 20 y 40 °C, obtenidos de las muestras de residuos plásticos representativas del AMB (actividad 8 de la fase de diseño conceptual). Según lo observado en la figura, la descomposición de los plásticos en la muestra comienza a temperaturas superiores a 600 K para cada una de las tasas de calentamiento. Además, cada pico del TGA indica la tasa máxima de descomposición del material, es decir, la temperatura en la que ocurre una pérdida rápida y significativa de masa. En particular, se identifica que para una tasa de calentamiento de 20 °C/min, la tasa máxima de descomposición se alcanza a 700 K.

**Figura 2**

*Termogramas obtenidos por análisis TGA*



*Nota.* Esta figura muestra la degradación del material plástico mediante los termogramas resultantes del análisis termogravimétrico a 4 diferentes tasas de calentamiento.

La tabla 7 y la figura 3 ilustran las regresiones lineales y las curvas obtenidas para las diferentes tasas de calentamiento, conforme a la aplicación de las ecuaciones (2) y (3) (del anexo 1) expuestas en la metodología. A partir de la pendiente de cada una de las ecuaciones resultantes para cada tasa de conversión, se determinaron las energías de activación de la mezcla, que se presentan en la tabla 8.

**Tabla 7**

*Datos de linealización de  $\beta$  respecto a la temperatura*

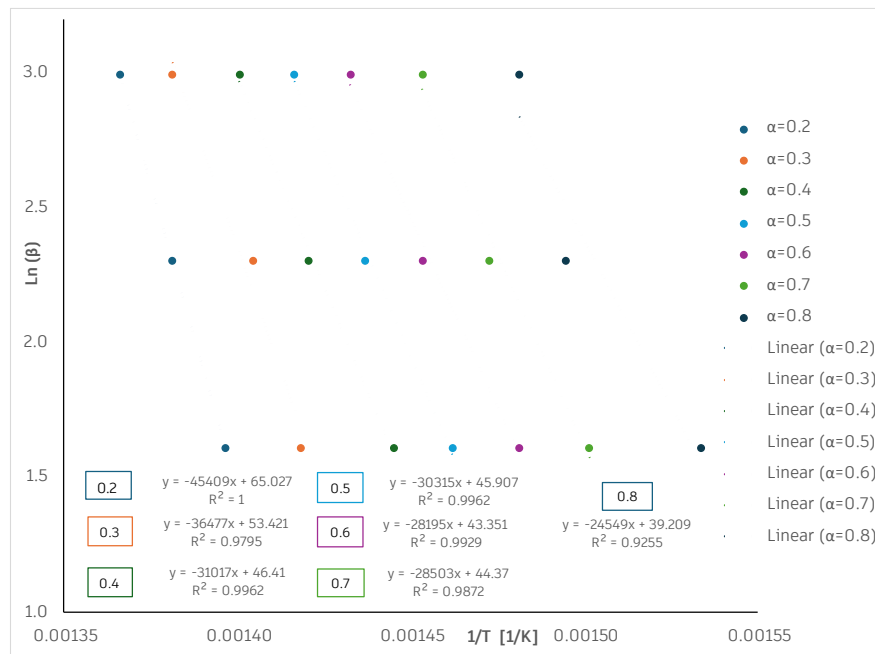
$\beta$ [°C/min]	$\ln(\beta)$	Tasa de conversión ( $\alpha$ )						
		20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
		1/T [1/K]						
5	1.60944	0.00140	0.00142	0.00145	0.00146	0.00148	0.00150	0.00153
10	2.30259	0.00138	0.00140	0.00142	0.00144	0.00145	0.00147	0.00149
20	2.99573	0.00137	0.00138	0.00140	0.00142	0.00143	0.00145	0.00148

*Nota.* Esta tabla muestra los datos de linealización de la tasa de calentamiento respecto a la temperatura y a diferentes tasas de conversión en un rango de [20%-80%].

Sin embargo, para corroborar la validez y el ajuste del modelo cinético aplicado, se recopilaron de la literatura datos sobre la energía de activación para cada tasa de conversión de los cinco tipos de plásticos presentes en la muestra analizada. Esto permitió realizar una comparación y establecer la desviación entre los resultados obtenidos y los datos disponibles en la literatura.

**Figura 3**

*Linealización de la tasa de calentamiento respecto a la temperatura a diferentes tasas de conversión*



*Nota.* Esta figura muestra la linealización de la tasa de calentamiento a distintas temperaturas y conversiones

De este modo, se calcularon las energías de activación que también se encuentran en la tabla 8, evidenciando que, aunque se observa un porcentaje de desviación para cada uno de los valores de energía de activación, esta desviación no es significativa, lo que valida el análisis realizado bajo el modelo utilizado.

**Tabla 8**

*Energías de activación para cada tasa de conversión.*

<b>Ea [KJ/mol] / <math>\alpha</math></b>	<b>20%</b>	<b>30%</b>	<b>40%</b>	<b>50%</b>	<b>60%</b>	<b>70%</b>	<b>80%</b>	<b>Citas</b>
<b>Ea Mezcla</b>	359.01	288.39	245.22	239.67	222.91	225.35	194.09	-
<b>Ea PE</b>	214.00	226.00	227.00	225.00	223.00	217.00	212.00	(Aboulkas et al., 2010)
<b>Ea PP</b>	191.00	191.00	189.00	195.00	179.00	170.00	162.00	(Aboulkas et al., 2010)
<b>Ea PVC</b>	415.70	333.90	284.00	235.00	218.50	220.90	235.00	(Wang et al., 2019)
<b>Ea PS</b>	233.90	217.24	184.72	180.54	167.91	169.75	146.20	(Ma et al., 2023)
<b>Ea PET</b>	305.76	288.20	254.06	246.86	244.86	242.71	223.43	(Yousef et al., 2023)
<b>Ea Estimado</b>	264.70	252.16	227.49	221.45	215.12	212.81	197.64	-
<b>Error</b>	35.6%	14.4%	7.8%	8.2%	3.6%	5.9%	1.8%	-

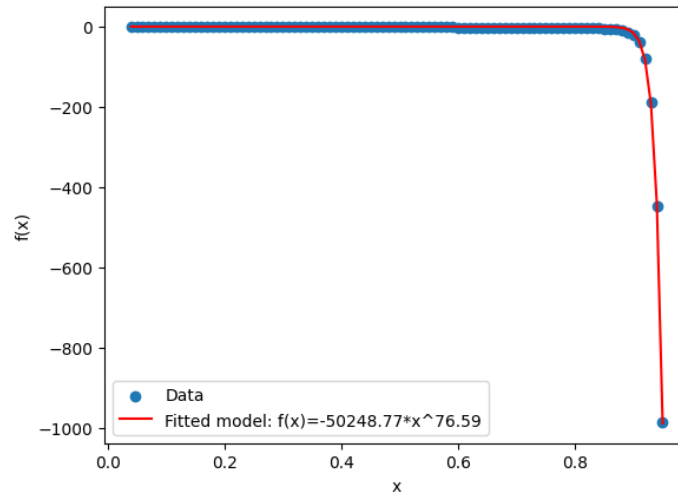
*Nota.* Esta tabla muestra los datos de energías de activación obtenidos a partir del análisis TGA y su comparación con las energías de activación presentes en la literatura para cada uno de los plásticos.

Los análisis se llevaron a cabo para diferentes tasas de calentamiento (5, 10, 20 y 40 °C/min). Sin embargo, se observó que las tasas de calentamiento bajas, como 10 y 20 °C/min (pirólisis lenta), producen hidrocarburos con poca o ninguna formación de cera debido al largo tiempo de residencia de los volátiles en la zona de calentamiento, lo que favorece el craqueo y permite la producción de hidrocarburos de bajo rango. Por otro lado, a mayores velocidades de calentamiento, como 20 °C/min, los hidrocarburos de cadena corta formados a partir del craqueo tienen menos oportunidades de experimentar un segundo craqueo, ya que el tiempo de residencia de los volátiles en el reactor es más breve (Peng et al., 2020).

Por ello, se decidió utilizar el modelo obtenido para la velocidad de calentamiento de 20 °C/min para llevar a cabo la simulación del reactor de pirólisis. La cinética resultante se presenta en la figura 4.

**Figura 4**

*Curva cinética del proceso de pirólisis de plásticos.*



*Nota.* Esta figura muestra la curva cinética obtenida mediante un ajuste exponencial de los datos de la tasa de conversión.

Con lo anterior y la información correspondiente del anexo 2, la expresión cinética determinada para la muestra representativa de los residuos plásticos queda la ecuación (1):

$$f(\alpha) = -50248.77 \alpha^{76.59} \quad (\text{Ec. 1})$$

## 4.2 Diseño básico

### 4.2.1. Diagrama PFD y simulación

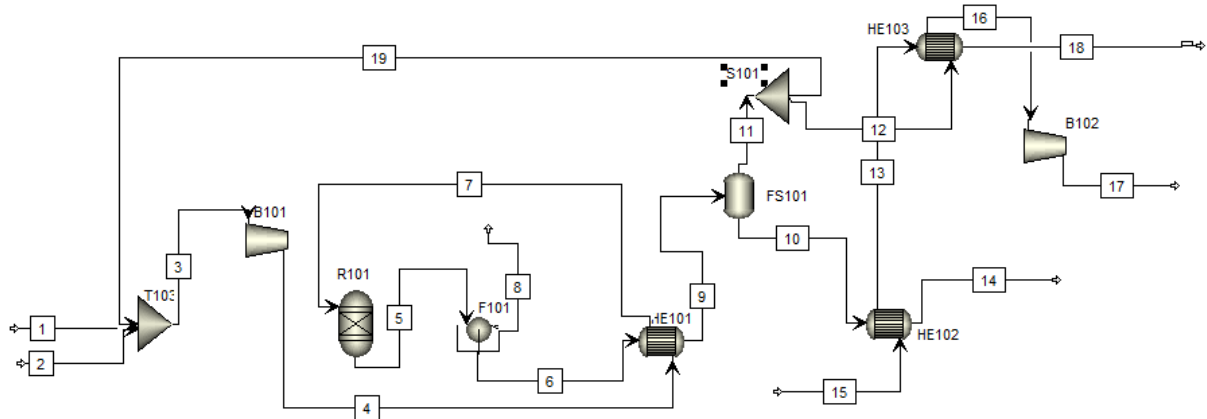
El diagrama de flujo de proceso (PFD) que se presenta en la figura 5 ilustra el diseño y funcionamiento de la planta de producción de combustible a partir de pirólisis de residuos plásticos. Este PFD incluye todos los equipos principales teniendo en cuenta la selección de la alternativa previamente descrita y así mismo incluye los flujos de materia en las corrientes del proceso. Para validar el diseño del PFD, se realizó una simulación utilizando Aspen Plus. El modelo se configuró siguiendo los elementos del PFD descrito y utilizando el modelo termodinámico NRTL debido a que en la literatura se demuestra su capacidad para manejar interacciones no ideales entre los diferentes componentes generados durante la degradación de los plásticos, así como, su efectividad en el modelamiento de fases líquidas y vaporización de los productos del proceso. Si bien el modelo termodinámico UNIFAC es útil para describir



en el diagrama PFD, con sus respectivas condiciones de operación, dimensiones, capacidades y su material de construcción.

**Figura 6**

*Simulación en Aspen Plus del proceso de pirólisis de plásticos.*



*Nota.* Esta figura muestra la simulación realizada en Aspen Plus del proceso de pirólisis, bajo las consideraciones descritas en la metodología.

**Tabla 9**

*Equipos de la planta de pirólisis*

Equipos	Código	Temperatura [°C]	Presión [bar]	Descripción	Tamaño	Material
Tanque almacenamiento	T101	25	1	Almacenamiento de residuos plásticos	Capacidad: 80 L	Acero al carbono
Triturador	G101	25	1	Reduce el tamaño de los residuos plásticos	Profundidad: 24,8 in Ancho: 20,5 in Alto: 37,4 in Capacidad: 150 kg	Acero al carbono
Tanque almacenamiento	T102	25	1	Almacenamiento de plásticos triturados	Capacidad: 10 L	Acero al carbono
Tanque almacenamiento	T103	38.02	2	Almacena plásticos triturados y N <sub>2</sub>	Capacidad: 20 L	Acero al carbono
Tanque almacenamiento	T104	120	1.8	Almacena combustibles líquidos	Capacidad: 150 L	Acero al carbono
Soplador	B101	38.02	2	Aumenta la presión de la	Capacidad: 695 cfm Diámetro: 8 in	Acero al carbono

corriente de N <sub>2</sub>						
Soplador	B102	38.02	2	Aumenta la presión de la corriente de N <sub>2</sub>	Capacidad: 695 cfm Diámetro: 8 in	Acero al carbono
Filtro Solidos	F101	495	2	Retira residuos sólidos de la corriente gaseosa a la salida de los reactores	Capacidad: 6500 m <sup>3</sup> /h Diámetro filtro: Mín.: 3 µm Máx.: 100 µm	Acero al carbono
Intercambiador de calor	HE101	120	2	Disminuye la temperatura de la corriente de entrada al <i>flash</i>	U: 850 W/m <sup>2</sup> C Área: 40.2677 cm <sup>2</sup>	Acero al carbono
Flash	FS101	120	1.8	Separación de combustibles líquidos y gaseosos.	Capacidad: 0.1223 m <sup>3</sup> D: 0.3048 m Altura: 1.676 m	Acero al carbono
Generador eléctrico para gases	G101	30	1.8	Transformación del combustible gaseoso en potencia eléctrica	Voltaje: 400 V Potencia: 7.2 kW	Acero inoxidable
Reactor tornillo	R101	500	2	Conversión de plásticos	Capacidad: 0.2152 m <sup>3</sup> Largo: 3.0149 m D: 0.3015 m	Acero inoxidable
Reactor de lecho fluidizado	R102	500	2	Conversión de plásticos	Capacidad: 0.2152 m <sup>3</sup> Largo: 3.0149 m D: 0.3015 m	Acero inoxidable
Cinta de transporte	CB101	-	-	Desplaza los plásticos hacia el triturador	Carga: 0.00278kg/s Largo: 1.6 m	Caucho
Cilindro de nitrógeno	C101	25	3	Almacena nitrógeno	Capacidad: 10 m <sup>3</sup>	Acero fundido

*Nota.* Esta tabla muestra los equipos presentes en proceso con sus principales características.

La Tabla 10 ofrece un análisis exhaustivo de las condiciones de operación y características técnicas de las tuberías empleadas en la planta. Proporciona información detallada para cada corriente y tubería, incluyendo la temperatura y presión de operación, la densidad másica del fluido, el flujo volumétrico, el diámetro óptimo y el diámetro nominal, así como el material recomendado para cada tipo de tubería. Se observa que los diámetros óptimos oscilan entre 0.091 pulgadas y 0.685 pulgadas. En cuanto a los materiales, se utilizan PVC y polipropileno en corrientes de baja temperatura, mientras que para condiciones de altas temperaturas y presiones se recurre a acero inoxidable y acero al carbono. La inclusión de acero inoxidable en algunas secciones es necesaria debido a la posibilidad de generar compuestos corrosivos, los cuales son eliminados en el filtro de heteroátomos.

**Tabla 10***Sistema de tuberías de la planta de proceso*

Corriente	Temperatura [°C]	Presión [bar]	Densidad másica [lb/cuft]	Flujo volumétrico [cuft/s]	Diámetro óptimo [in]	Diámetro nominal [in]	Material
1	25	1	47.009	6.51E-05	0.187	1/4	PVC
2	25	1	0.071	0.009	0.337	1/2	PVC
3	48.27	2	0.350	0.015	0.544	1/2	PVC
4	38.26	2.027	0.364	0.014	0.541	1/2	Acero Inoxidable
5	500.00	2	0.098	0.053	0.685	3/4	Acero al Carbono
6	505.00	1.5	0.063	0.071	0.703	3/4	Acero al Carbono
7	367.73	2.027	0.177	0.029	0.615	3/4	Acero Inoxidable
8	505.00	1.5	140.464	5.05E-06	0.091	1/8	Acero al carbono
9	120	1.5	0.135	0.033	0.613	3/4	Acero Inoxidable
10	120	1.8	63.599	2.32E-05	0.136	1/4	Acero Inoxidable
11	120	1.8	0.108	0.0275	0.551	1/2	Acero Inoxidable
12	120	1.8	0.108	0.0137	0.430	1/2	Acero Inoxidable
13	29.47	1.013	61.781	0.0002	0.293	3/8	PVC
14	30	1.8	67.879	2.18E-05	0.134	1/4	PVC
15	25	1.013	62.051	0.0002	0.293	3/8	PVC
16	40	1.8	0.137	0.0108	0.412	1/2	Acero Inoxidable
17	57.149	2	0.143	0.0104	0.408	1/2	Acero Inoxidable
18	32.748	1.013	61.582	0.0002	0.293	3/8	PVC
19	120	1.8	0.108	0.0137	0.430	1/2	Acero Inoxidable

*Nota.* Esta tabla muestra el sistema de tuberías seleccionadas para el proceso junto con sus principales características.

#### **4.2.2. Análisis de seguridad HAZOP**

El análisis HAZOP representado en la tabla 11 se centra en los equipos que presentan riesgos relacionados con la presión, la temperatura y el derrame de líquidos. Los equipos de riesgo bajo, como el triturador (G101) y el soplador (B101-2), presentan desviaciones que no generan consecuencias graves. Por ejemplo, el triturador puede sufrir interrupciones en su funcionamiento debido a fallos en el suministro eléctrico, lo que podría afectar la eficiencia del proceso sin causar daños significativos. Para estos equipos, se recomienda contar con

fuentes de energía alternativas y asegurar que la cinta de transporte no sobrecargue el triturador. Los equipos de riesgo medio, como el generador eléctrico (G101) y el intercambiador de calor (HE101), pueden causar problemas significativos si no se gestionan adecuadamente. Por ejemplo, el generador puede verse afectado por un exceso de combustible si las válvulas no regulan su entrada, lo que podría resultar en fugas. Se sugiere ajustar los sistemas de control para limitar el flujo máximo y tener extintores cerca para manejar posibles incendios. Por otra parte, los equipos de alto riesgo, como el Flash (FS101) y los reactores (R101 y R102), tienen un potencial elevado para causar incidentes catastróficos.

A partir del análisis HAZOP realizado, se identificó la necesidad de implementar un sistema de alarmas que permita monitorear y gestionar los riesgos asociados a cada equipo de manera efectiva. En la tabla 12, se detallan las alarmas recomendadas para los equipos clasificados con riesgo alto, junto con sus respectivas condiciones de activación, teniendo en cuenta que todas al momento de su activación emiten patrones de destello mediante una luz de advertencia y así mismo las alarmas son de tipo sonoro.

Las alarmas asociadas a los reactores son cruciales para garantizar la seguridad y eficiencia del proceso. Tanto el reactor de tornillo (R101) como el reactor de lecho fluidizado (R102) cuentan con una alarma de temperatura que se activa cuando la temperatura excede los 600 °C. Esta alarma asegura que el sistema mantenga un enfriamiento adecuado, previniendo así problemas que podrían provocar incidentes peligrosos. Por ello, es fundamental la supervisión constante de la temperatura en estos reactores para mantener el proceso dentro de parámetros seguros.

Tabla 11

## Análisis de seguridad HAZOP

Equipo	Desviación		Causas	Consecuencias	Salvaguardas	Riesgo potencial	Recomendaciones
	Pg	Parámetro					
<b>Tanque almacenamiento (T101-103)</b>	+	Nivel	Sobrecarga de la materia prima o acumulación de carga por obstrucciones	Derramamiento de los materiales y pérdida de material	Revisar que los niveles de los tanques no superen un umbral de operación del 90%	Bajo	
<b>Tanque almacenamiento (T104)</b>	+	Nivel	Sobrecarga de líquidos por acumulación o problemas en la salida del almacenamiento	Derramamiento de los combustibles líquidos y posible combustión	Garantizar que el control de salida y entrada al tanque este regulado un nivel del tanque no superior al 80%	medio	No colocar el T104 cerca de sustancias o equipos que estén a altas temperaturas para evitar combustión de líquidos derramados
<b>Triturador (G101)</b>	Ausencia	Electricidad	Fallo en el suministro energético del proceso	La materia no entrará a las condiciones necesarias al reactor por lo que la reacción no será efectiva	Tener una fuente de energía alternativa en casos de ausencia	bajo	
<b>Triturador (G101)</b>	+	Flujo	La cinta de transporte introduce más material de que tiene capacidad para tratarlo	El equipo no será capaz de tratar toda la materia por lo que se deberá pasar el proceso para acoplar el triturador	Garantizar que la cinta de transporte tenga una velocidad máxima que no pueda abrumar al equipo	bajo	
<b>Soplador (B101-2)</b>	-	Presión	Alta caída de presión en los demás equipos de procesos	Obstrucción de los filtros y regresión de flujos en las corrientes del proceso	Se debe garantizar una presión mínima que se bombee para que el proceso no presente fallas	bajo	
<b>Soplador (B101-2)</b>	Ausencia	Electricidad	Fallo en el suministro energético del proceso	Los compuestos no fluirán por los equipos correctamente	Tener una fuente de energía alternativa en casos de ausencia	bajo	
<b>Filtro Sólidos (F101-2)</b>	+	Flujo	Corriente de alimentación de plásticos y nitrógeno al proceso aumenta drásticamente	El filtro puede presentar taponamientos o simplemente no puede ser remover una parte significativa de los sólidos de la corriente	Sistema de alivio en el que se evita el uso del filtro y se manda la corriente por otro sistema de tuberías	bajo	
<b>Filtro Sólidos (F101-2)</b>	+	Presión	No se ha hecho una limpieza y/o mantenimiento adecuado del equipo	Se pueden presentar obstrucciones	Realizar mantenimiento periódico de los equipos. Incorporar un sistema de alivio evitando el uso del filtro y se envía el flujo por una tubería.	medio	Colocar una alarma de presión para saber en qué caso se debe accionar las válvulas del proceso para pasar el flujo por el sistema de tuberías alternativo
<b>Intercambiador de calor (HE101)</b>	+	Temperatura	Baja cantidad de corriente de entrada al proceso	La corriente caliente del intercambiador no logrará enfriarse lo que provocará dificultades en el sistema de enfriamiento del flash	Sistema de control que garantiza que la entrada de las corrientes alcance la temperatura deseada	Medio	Diseñar una corriente de enfriamiento de emergencia para el Flash
<b>Flash (FS101)</b>	+	Temperatura	Intercambiador de calor no logra disminuir la temperatura	No se generarán combustibles líquidos para el procesamiento y todos los gases saldrán por el tope del flash	Sistema de control que garantiza que la entrada de las corrientes alcance la temperatura deseada	Alto	Diseñar una corriente de enfriamiento de emergencia para el Flash

<b>Flash (FS101)</b>	+	Presión	No se libera la corriente gaseosa a la salida del equipo	Se puede generar un aumento crítico de la presión en el equipo donde se puede ocasionar la explosión de este	El sistema de control que garantiza que la salida de la corriente gaseosa mediante la revisión de la presión que se tiene en el flash	Alto	
<b>Flash (FS101)</b>	+	Nivel	No se libera el efluente líquido para que baje al tanque de almacenamiento	Acumulación de los líquidos en el sistema lo que afectaría el equilibrio de operación del flash y podría generar derramamiento de combustibles	El sistema de control que garantiza que la salida de la corriente líquidos mediante la revisión del nivel que se tiene en el flash	Alto	
<b>Generador eléctrico (G101)</b>	Ausencia	Electricidad	Fallo en el suministro energético del proceso	La combustión de los gases de modo que solo se estarían emitiendo emisiones y combustibles al ambiente	Tener una fuente de energía alternativa en casos de ausencia	Medio	
<b>Generador eléctrico (G101)</b>	+	Flujo	Las válvulas no regulan correctamente la entrada de combustible que puede entrar al reactor	El generador se verá abrumado por la cantidad de combustible a tratar y se presentarán derramamiento y fugas que puedan generar incendios.	Ajustar adecuadamente los sistemas de control para que tengan un tope máximo de flujo que pueda emitir el proceso	Medio	Tener cerca extintor para garantizar que en caso de incendios se tenga una forma de controlarlo
<b>Reactor tornillo (R101)</b>	+	Temperatura	El sistema de calentamiento eléctrico no opera adecuadamente	Se puede generar un aumento crítico de la temperatura en el equipo donde se puede ocasionar la explosión de éste.	Tener un sistema de control que tome una acción correctiva y un adecuado sistema de enfriamiento	Alto	
<b>Reactor de lecho fluidizado (R102)</b>	+	Temperatura	El sistema de calentamiento eléctrico no opera adecuadamente.	Se puede generar un aumento crítico de la temperatura en el equipo donde se puede ocasionar la explosión de éste.	Tener un sistema de control que tome una acción correctiva y un adecuado sistema de enfriamiento	Alto	
<b>Reactor de lecho fluidizado (R102)</b>	-	Presión	El sistema de soplado no es efectivo	La reacción ocurrirá en una menor proporción debido a que el sistema no está fluidizado por lo que el proceso perderá valor	El soplador funciona a unas condiciones mínimas para garantizar la fluidización del reactor	bajo	
<b>Cinta de transporte (CB101)</b>	Ausencia	Electricidad	Fallo en el suministro energético del proceso	No habrá alimentación al proceso por lo que todo se verá afectado, generando malfuncionamiento y alarmas en las siguientes fases del proceso	Tener una fuente de energía alternativa en casos de ausencia	bajo	
<b>Cilindro de nitrógeno (C101)</b>	-	presión	Baja cantidad de nitrógeno en el cilindro de alimentación	No habrá alimentación al proceso, generando malfuncionamiento y alarmas en las siguientes fases del proceso	Tener otro cilindro de reserva para el proceso	bajo	
<b>Tanque almacenamiento (T105)</b>	+	presión	Se bombea más gas del que puede ser almacenado en el tanque	Puede generarse una explosión por sobre presurización del tanque	Sistema de control que limite o cierre completamente el flujo de gas que entra al tanque	Alto	

*Nota.* Esta tabla muestra el riesgo potencial de las variables del proceso en cada uno de los equipos, así como su análisis de seguridad y recomendaciones para mitigar los riesgos asociados.

**Tabla 12**

*Definición del sistema de alarmas de la planta de proceso.*

<b>Equipo</b>	<b>Tipo de Alarma</b>	<b>Condición de Activación</b>	<b>Descripción</b>
Flash (FS101)	Alarma de presión (A01)	Cuando la presión interna exceda los límites seguros (2.7 bar)	Previene explosiones al alertar sobre acumulaciones peligrosas.
	Alarma de nivel alto (A02)	Cuando el nivel supere el 80%	Prevenir derrames y combustiones por acumulación excesiva de líquidos.
Tanque almacenamiento (T105)	Alarma de sobrepresión (A03)	Cuando la presión interna exceda los límites seguros (3 bar)	Previene explosiones al alertar sobre condiciones críticas en el tanque.
Reactor de tornillo (R101)	Alarma de temperatura(A04)	Cuando la temperatura exceda los 600 °C	Asegura un enfriamiento adecuado y previene problemas en el proceso.
Reactor de lecho fluidizado (R102)	Alarma de temperatura(A05)	Cuando la temperatura exceda los 600 °C	Asegura un enfriamiento adecuado y previene problemas en el proceso.
	Alarma de presión	Cuando la presión interna exceda los límites seguros (2 bar)	Previene explosiones al alertar sobre acumulaciones peligrosas.

*Nota.* Esta tabla muestra los sistemas de alarma establecidos para los equipos determinados de riesgo alto en la planta, junto con sus condiciones de activación y código de identificación en el diagrama P&ID.

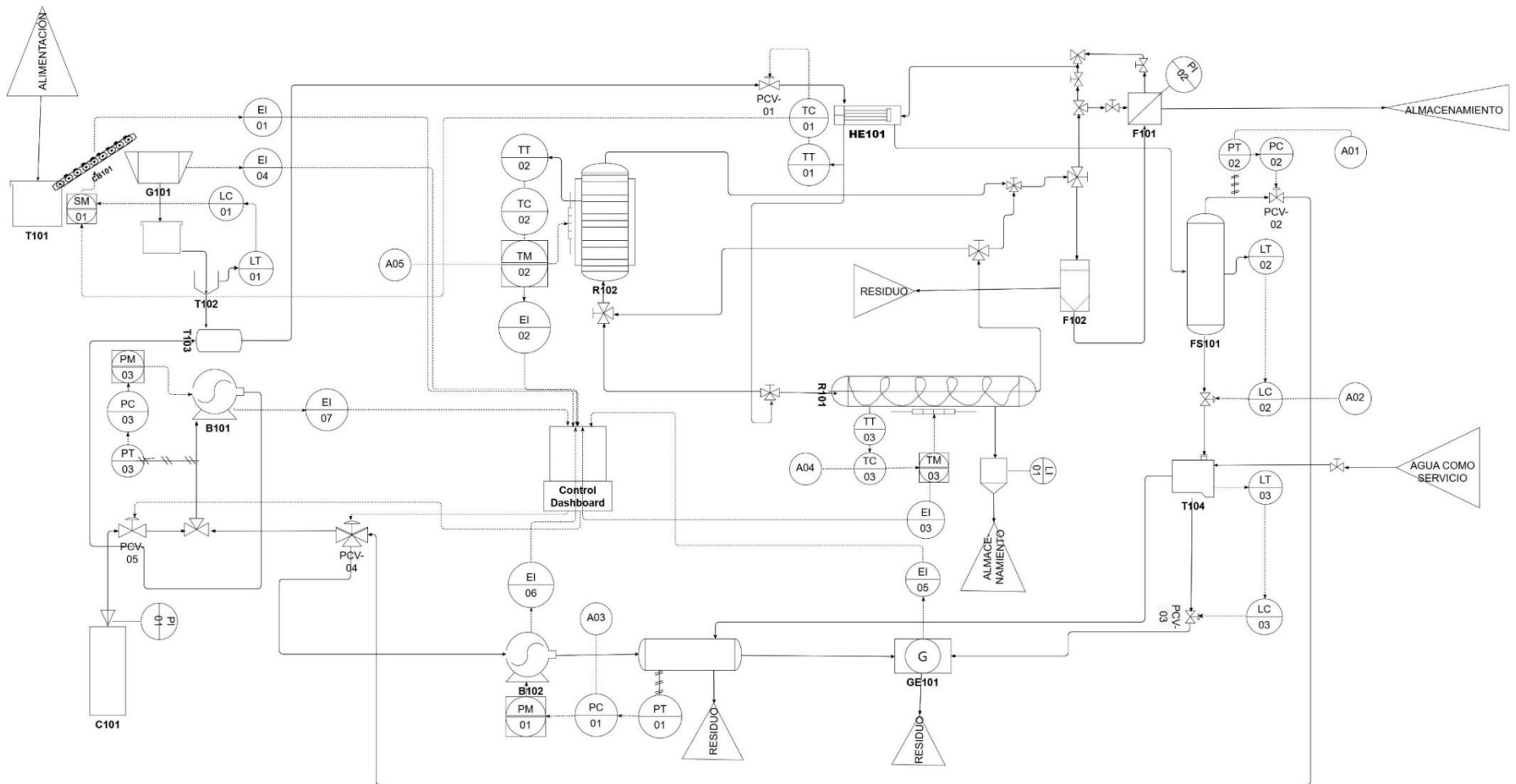
#### **4.2.4. Esquema de control – P&ID**

En el diagrama P&ID (figura 7) se presentan diez lazos de control diseñados para la planta de pirólisis de residuos plásticos, junto con el panel de control que gestiona el sistema. Estos lazos se describen en la tabla 13, que analiza las variables controladas y manipuladas, así como las acciones en caso de falla y las configuraciones de los controladores. Cada lazo está diseñado para controlar variables operativas como temperatura, presión y nivel. Por ejemplo, el lazo LIC-01 regula el nivel del tanque T102 manipulando la velocidad de la cinta transportadora, con un *set point* del 80% del nivel del tanque. Este valor permite un margen para imprevistos, evitando que el tanque se llene completamente y minimizando riesgos de derrames.

El lazo LIC-01 se clasifica como cerrado en falla; si hay un fallo en el sensor, el sistema detiene la cinta transportadora para prevenir la acumulación de material plástico en el tanque y así evitar derrames. La acción del controlador es inversa: si el nivel del tanque disminuye, el controlador incrementa la velocidad de la cinta transportadora para permitir más entrada de materia prima y estabilizar el nivel. Este diseño asegura la seguridad del proceso y un funcionamiento eficiente del sistema.

Figura 7

Diagrama P&ID con alarmas.



Nota. Esta figura muestra el diagrama de tuberías e instrumentación de la planta con sus respectivos lazos de control y sistemas de alarma.

**Tabla 13**

*Descripción del sistema de control establecido para el proceso.*

<b>Lazo de control</b>	<b>Variable controlada</b>	<b>Variable manipulada</b>	<b>Acción en falla del elemento final</b>	<b>Acción del controlador</b>	<b>Set point de variable controlada (SP)</b>	<b>Corriente o equipo de variable controlada</b>	<b>Corriente o equipo de variable manipulada</b>
<b>LIC-01</b>	Nivel del tanque	Velocidad de la cinta transportadora	Cerrado en falla	Inversa	80% del nivel del tanque	T102	CB101
<b>LIC-02</b>	Nivel del <i>flash</i>	Flujo de líquido de salida <i>flash</i>	Abierto en falla	Directa	70% del nivel	FS101	Corriente de líquido de salida <i>flash</i>
<b>LIC-03</b>	Nivel del tanque	Flujo de salida del tanque	Abierto en falla	Directa	80% del nivel del tanque	T104	Corriente de salida del tanque
<b>PIC-01</b>	Presión	Flujo de gases a la entrada del generador	Cerrado en falla	Inversa	1.8 bar	T105	Corriente de gases a la salida del soplador
<b>PIC-02</b>	Presión	Flujo de gases de salida <i>flash</i>	Abierto en falla	Directa	1.8 bar	FS101	Corriente de gases de salida <i>flash</i>
<b>PIC-03</b>	Presión	Flujo de nitrógeno	Abierto en falla	Inversa	1.8 - 2 bar	B101	Corriente de nitrógeno
<b>TIC-01</b>	Temperatura	Flujo de agua	Abierto en falla	Directa	120 °C	HE101	Corriente de agua de enfriamiento
<b>TIC-02</b>	Temperatura	Potencia eléctrica	Cerrado en falla	Inversa	500 °C	R102	Potencia eléctrica de la resistencia
<b>TIC-03</b>	Temperatura	Potencia eléctrica	Cerrado en falla	Inversa	500 °C	R101	Potencia eléctrica de la resistencia

*Nota.* Esta tabla muestra la descripción de los 9 lazos de control del proceso.

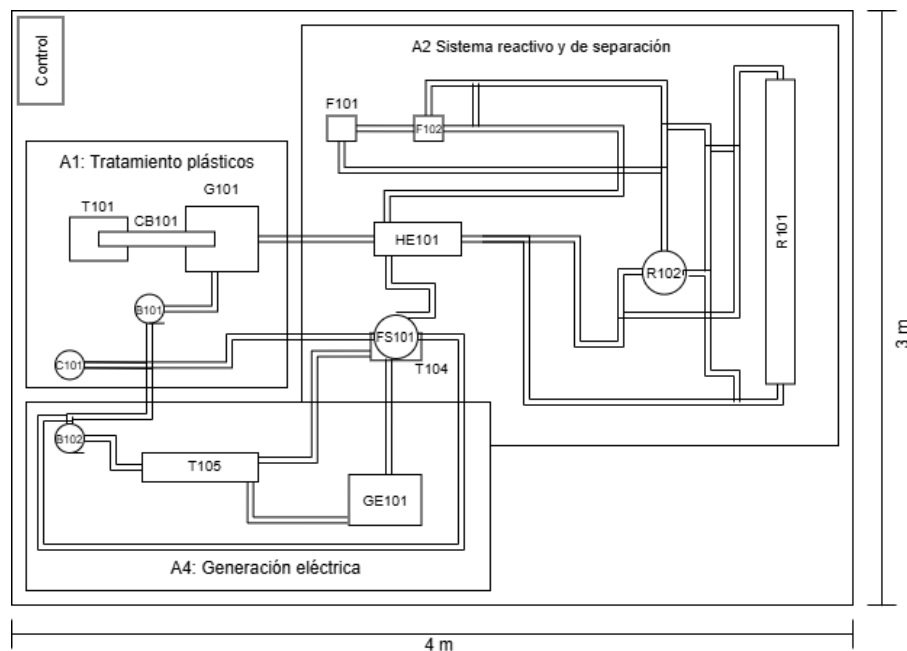
#### **4.2.5. Distribución espacial de los equipos y vista isométrica**

El *Plot plan* desarrollado para la planta de procesamiento e ilustrado en la figura 9 se centra en optimizar la disposición de los equipos y las áreas operativas para maximizar la eficiencia y la seguridad. En este plano, se han ubicado cuatro áreas centrales de acuerdo con las distintas etapas del proceso. La primera área corresponde al tratamiento de los residuos plásticos donde se llevan

a cabo procesos de adecuación y disminución del tamaño de partícula. La segunda área corresponde al sistema reactivo donde se realiza la degradación de la materia mediante pirólisis en dos reactores, uno de lecho fluidizado (R102) y el otro corresponde a un reactor de tornillo (R101). En la tercera área se ubican los equipos de separación tanto de fases líquidas y gaseosas, así como filtros de separación de residuos sólidos. Finalmente, el área cuatro comprende los equipos de generación de energía eléctrica mediante productos líquidos y gaseosos obtenidos del proceso. Es importante resaltar que los equipos se ilustraron con base en el diagrama PFD anteriormente presentado y así mismo no se plantearon rutas de acceso de vehículos de carga y personal, áreas de almacenamiento y expansiones futuras debido a que la planta es a escala piloto y no requiere de la contemplación de dichas zonas.

**Figura 8**

*Plot Plan de la planta de pirólisis de residuos plásticos*



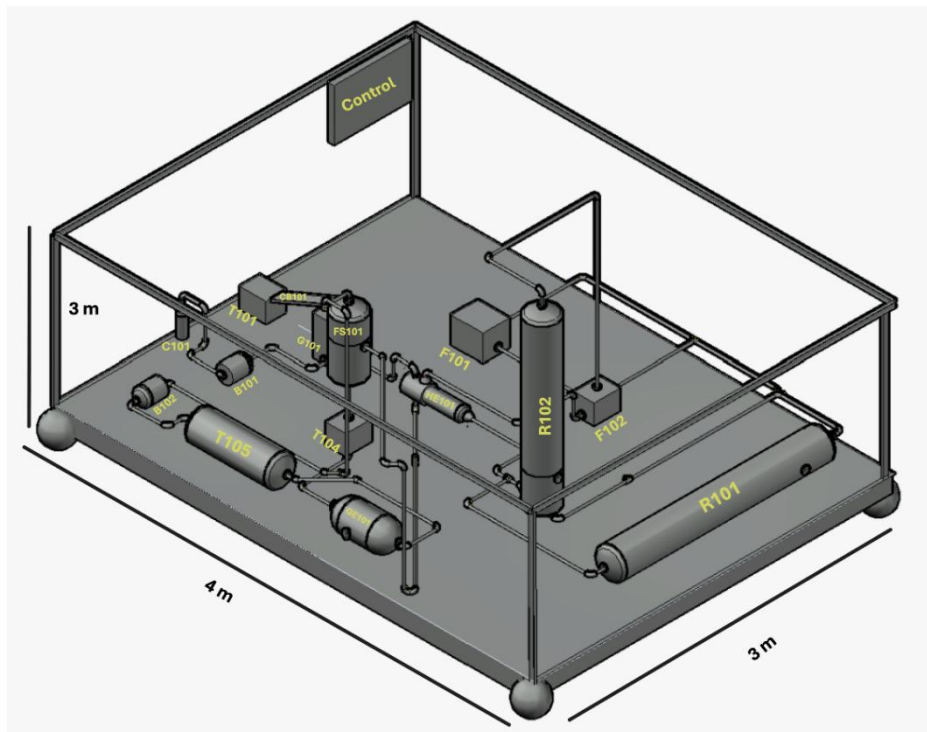
*Nota.* Esta tabla figura muestra la vista superior y la distribución de equipos y áreas de la planta, así como su respectivo tamaño.

El diagrama isométrico presentado en la figura 9 ilustra la disposición y las dimensiones de la planta piloto de pirólisis de residuos plásticos. En el diagrama, se pueden identificar los dos reactores diseñados para llevar a cabo la pirólisis, el reactor R101 observado en la cara lateral y el

reactor R102 observado en la cara superior del diagrama. Ambos reactores están conectados a un sistema de alimentación que proporciona los residuos plásticos; además, cuentan con tubos de salida para los gases generados y los productos líquidos. En la parte posterior de la planta, se muestra el sistema de separación, encargado de recuperar los combustibles y eliminar los residuos sólidos. Las dimensiones y escalas utilizadas en el diagrama corresponden a 3 m de alto, 3 metros de ancho y 4 metros de largo, proporcionando una representación precisa de la planta.

**Figura 9**

*Diagrama isométrico de la planta piloto.*



*Nota.* La figura muestra la ubicación tridimensional de la planta de procesos desde una vista isométrica.

## 4.3 Evaluación financiera

### 4.3.1. Estimación de los costos de capital (CAPEX)

Los costos de capital se calcularon mediante la aplicación del método de la curva de costos teniendo en cuenta el efecto del material, el factor corrector del equipo y la corrección del tiempo. Cabe resaltar que los costos fueron consultados en línea y que los costos de traslado no se tuvieron

en cuenta al momento de los cálculos. Los resultados se muestran en la tabla 14, donde se obtiene un CAPEX de \$58,188.62 USD. Así mismo, para el cálculo de los costos fijos totales de la planta se usó el método de los factores de Lang, usando un factor de 1.1 (McConville, 2002), obteniendo como resultado costos fijos totales de \$ \$64,007.49 USD (FCI).

**Tabla 14**

Costos fijos de la planta de procesamiento.

<b>COSTOS FIJOS</b>			
<b>EQUIPOS</b>	<b>Cantidad de equipos</b>	<b>Costo Equipo [USD]</b>	<b>Costo total [USD]</b>
<b>Tanque Almto. (T101)</b>	1	\$38.55	\$38.55
<b>Triturador (G101)</b>	1	\$274.37	\$274.37
<b>Tanque Almto. (T102)</b>	1	\$224.48	\$224.48
<b>Tanque Almto. (T103)</b>	1	\$224.48	\$224.48
<b>Tanque Almto. (T104)</b>	1	\$374.14	\$374.14
<b>Tanque Almto. (T105)</b>	1	\$227.88	\$227.88
<b>Soplador (Compresor) (B101)</b>	1	\$6,235.63	\$6,235.63
<b>Soplador (Compresor) (B102)</b>	1	\$3,798.07	\$3,798.07
<b>Filtro Solidos (F101)</b>	1	\$748.28	\$748.28
<b>Filtro heteroátomos (F102)</b>	1	\$3,736.84	\$3,736.84
<b>Int. de calor (HE101)</b>	1	\$1,179.10	\$1,179.10
<b>Flash (FS101)</b>	1	\$14,965.51	\$14,965.51
<b>Generador eléctrico (G101)</b>	1	\$2,555.47	\$2,555.47
<b>Reactor tornillo (R101)</b>	1	\$8,303.59	\$8,303.59
<b>Reactor de lecho fluidizado (R102)</b>	1	\$14,530.15	\$14,530.15
<b>Cinta de transporte (CB101)</b>	1	\$134.92	\$134.92
<b>Cilindro de nitrógeno (C101)</b>	1	\$637.17	\$637.17
<b>#Equipos total</b>	16	<b>CAPEX total [USD]</b>	\$58,188.62

*Nota.* Esta tabla muestra los equipos del proceso con sus costos (CAPEX).

#### **4.3.2. Estimación de los costos de operación (OPEX)**

Para la estimación de los costos de operación, no se tuvieron en cuenta los costos asociados con la supervisión y el trabajo de oficina, patentes y licencias, impuestos y obligaciones, costos de administración, así como los costos de distribución y ventas. Esto se debe a que el diseño básico desarrollado se realizó a escala piloto. Por otra parte, los costos de materias primas se estimaron mediante la consulta de los precios correspondientes en el mercado; estos precios están detallados en la tabla 19 del anexo 4.

Asimismo, se destaca que dentro de los costos de servicios industriales no se considera el costo de energía, ya que la energía requerida por la planta, correspondiente a 5.505 kW/h es suministrada de forma completa por la misma planta, tal como se muestra en las tablas 20 y 21 del anexo 4.

**Tabla 15**

Costos de operación

COSTOS DE OPERACIÓN	
ÍTEM DE COSTO	VALOR ESTIMADO ANUAL [USD]
Materias primas	\$ 5,289.13
Servicios	\$ 317.42
Mano de obra	\$ 5,973.45
Mantenimiento	\$ 705.85
<b>Costos de Operación total anual [USD]</b>	<b>\$ 12,285.85</b>

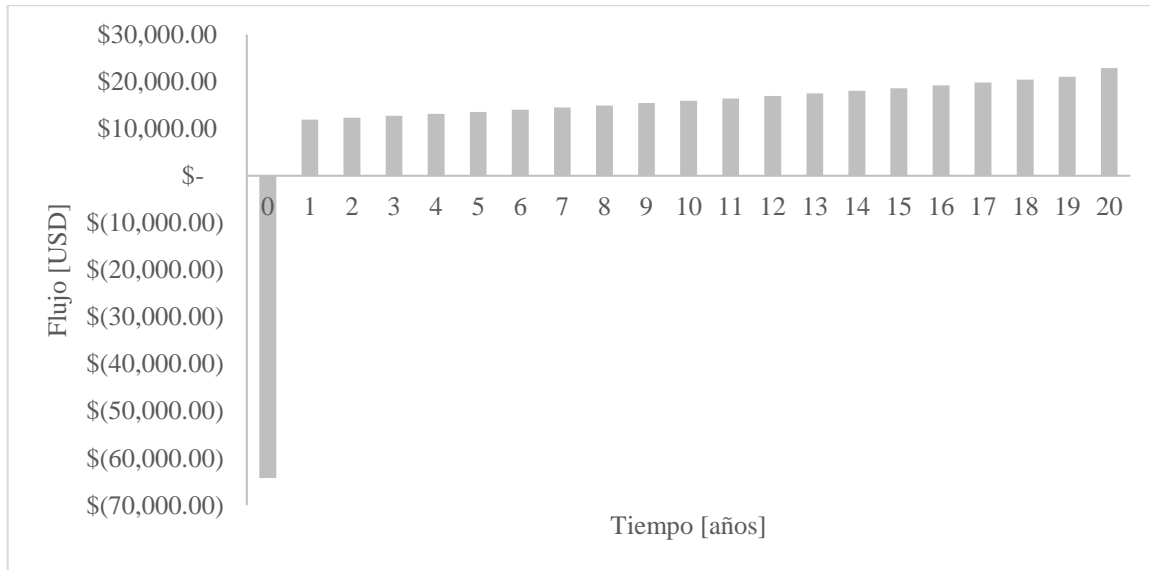
*Nota.* Esta tabla muestra los costos de operación del proceso, el costo de la materia prima se puede encontrar en más detalle en la tabla 19. El costo de los servicios únicamente corresponde al agua que se usa, ya que la energía eléctrica que la planta consume es autogenerada por el mismo proceso.

#### **4.3.3. Flujos de caja e indicadores financieros**

El presupuesto de inversión se determinó en un valor correspondiente a \$ 64,232 USD. Al ser la planta a escala piloto se despreciaron los costos de terrenos, construcción de obras civiles, gastos de organización, montaje, puesta en marcha y capacitación de personal. La tabla 22 del anexo 4 detalla los costos considerados para el cálculo de la inversión.

Los cálculos del flujo de caja e indicadores financieros fueron desarrollados en la plantilla del profesor Orlando Camacho de la Escuela de ingeniería química. Los resultados se presentan en la figura 10 y la tabla 23 del anexo 4 y se desarrollan bajo los siguientes postulados:

- Horizonte del proyecto: 20 años
- Tasa mínima de retorno de los inversores: 12% E.A
- Impuesto de renta: 35% EA
- Inflación: 4% E.A
- Depreciación lineal

**Figura 10***Flujos de caja durante el horizonte del proyecto*

*Nota.* Esta figura muestra los flujos de caja del proyecto en un horizonte de 20 años.

El resultado de análisis financiero muestra que el proyecto es rentable y es posible su adecuación ya que se obtiene un valor de VPN de \$45,494.55 USD, de ROI de 70.81% y una rentabilidad (TIR) del 21.09%. Esto ocurre porque los costos de operación son menores en cada año de producción que las ganancias generadas por la venta de los productos descritos en la tabla 17 del anexo 3. Así mismo, los costos de operación se ven reducidos debido al abastecimiento de energía por parte de la misma planta, convirtiéndola en autosuficiente energéticamente.

#### **4.3.4. Análisis de sensibilidad**

Se realizó un análisis de sensibilidad bidimensional en el que se variaron los ingresos generados por la planta y los egresos en incrementos y decrementos del 0.8% en un rango de [0.0% - 16.0%]. Este análisis incluía tanto escenarios de sensibilidad positiva como negativa. En el caso de la sensibilidad negativa, se examinaron los impactos de la disminución de los ingresos junto con el aumento de los costos operativos. Se identificaron puntos críticos, como una reducción del 8.8% en los ingresos combinada con un incremento del 10.4% en los costos operativos. A pesar de estos cambios adversos, el proyecto mantuvo su viabilidad incluso con una disminución del 9% en ganancias y un aumento similar en las pérdidas, lo que resalta su robustez financiera.

Además, se estableció que la máxima disminución posible en los ingresos, sin que los egresos se alteraran, es del 15.3%. En contraste, se observó que los egresos pueden aumentar hasta un 24.2% mientras que los ingresos permanecen constantes. Esto pone de manifiesto que los ingresos tienen un papel crucial en la viabilidad del proyecto, superando en importancia a los egresos. Estos hallazgos subrayan la necesidad de monitorear de cerca los ingresos para asegurar el éxito sostenible de la planta.

Por otra parte, el análisis de sensibilidad positiva mostró que las variaciones en las ganancias obtenidas del proceso ejercen mayor influencia sobre la rentabilidad del proyecto en comparación con la disminución de los costos operativos. Los diferentes escenarios considerados tanto en el análisis de sensibilidad positivo como negativo se encuentran detallados en las tablas 26 y 27 del anexo 4.

#### **4.4 Comentarios finales**

Para diseñar una planta piloto que procese plásticos en el contexto de investigación y demostración del proceso de pirólisis, es fundamental considerar varios parámetros clave. En primer lugar, la temperatura de operación óptima se sitúa en 500 °C, lo cual es crucial para maximizar la conversión de plásticos en combustibles líquidos y otros productos valiosos. Además, la elección del tipo de reactor impacta significativamente la eficiencia del proceso; se recomienda utilizar un reactor de lecho fluidizado o un reactor de tornillo rotatorio, ya que estas configuraciones han demostrado ser efectivas en la producción de combustibles a partir de plásticos. La cantidad de procesamiento sugerida para una planta piloto es de aproximadamente 10 kg/h, lo que permite evaluar la viabilidad económica en una escala que simule condiciones industriales. También es importante mantener una tasa de calentamiento adecuada, idealmente alrededor de 20 °C/min, para prevenir la formación de ceras y evitar un segundo craqueo. Por último, se aconseja utilizar una mezcla de plásticos municipales, como polietileno y polipropileno, para evitar problemas relacionados con la separación y mejorar la eficiencia del proceso.

## 5. Conclusiones

En el contexto del apoyo a la transición energética, se ha desarrollado el diseño conceptual de una planta de pirólisis de residuos plásticos, que transforma desechos en energía eléctrica. A lo largo del desarrollo del proyecto, se han identificado y considerado diversas limitaciones, como la necesidad de un control técnico, el manejo adecuado de emisiones y residuos, la implementación de estrictos protocolos de seguridad y los altos costos iniciales. Cada uno de estos aspectos ha sido abordado para garantizar que la planta no solo sea viable desde el punto de vista técnico, sino también ambiental y desde el punto de vista financiero.

El diseño final de la planta incluye un sistema de pretratamiento físico para acondicionar los plásticos, el uso de dos reactores que aseguran la versatilidad del proceso, un sistema de separación para recuperar combustibles aprovechables, y un sistema de recuperación energética que optimiza el uso de energía. Este enfoque cumple con los requerimientos técnicos y operativos necesarios para un manejo eficiente de residuos plásticos, promoviendo a su vez una gestión ambiental sostenible.

Se ha establecido una tasa de tratamiento de 10 kg/h de corriente de plásticos representativos de Bucaramanga, que requerirá 5.5 kWh para su operación. La planta está diseñada para generar 15.25 kWh adicionales, lo que se traduce en ingresos significativos. Para garantizar el control adecuado del proceso, se implementó un sistema de control de diez lazos y un panel central para regular variables clave como temperatura, presión y nivel. Además, se siguieron normativas de diseño para la elaboración de diagramas isométricos y el Plot Plan, asegurando una distribución espacial efectiva de los equipos. La seguridad industrial fue abordada mediante un análisis de seguridad HAZOP y un sistema de alarmas de acuerdo con los riesgos identificados en la planta.

Desde un enfoque financiero, se realizó un análisis detallado que incluye el cálculo del CAPEX, OPEX, flujos de caja, costos de inversión y escenarios de sensibilidad financiera. Esta evaluación determinó la viabilidad económica del proyecto a 20 años con una operación anual de 8200 h, considerando una operación de la planta de 8,200 horas anuales. Los resultados indican una tasa interna de retorno del 21.09%, un valor presente neto de \$45,494.55 USD y un retorno sobre la inversión del 70.81%. Estos resultados no solo validan la viabilidad de la tecnología de pirólisis a nivel piloto, sino que también destacan la robustez financiera del proyecto, mostrando la viabilidad para su implementación y operación.

## 6. Recomendaciones

Basándose en los resultados obtenidos y las conclusiones presentadas, se sugiere avanzar hacia la etapa de diseño detallado de la planta, lo cual permitirá una evaluación más integral y precisa de su viabilidad operativa. Este diseño permitirá una evaluación más exhaustiva, incluyendo la especificación precisa de los equipos, el diseño detallado de los lazos y elementos de control y monitoreo, así como la definición de protocolos de operación y mantenimiento. Además, facilitará la identificación de posibles desafíos y limitaciones de implementación y de escenarios financieros más realistas.

Por otra parte, se recomienda llevar el diseño detallado a una fase de puesta en marcha de tal forma que se valide su adecuación, funcionamiento y viabilidad de escalabilidad. Esta fase permitirá evaluar las condiciones reales de los parámetros operativos y la eficiencia del proceso en la conversión de residuos plásticos en combustibles. Así mismo, permitirá evaluar la calidad de los productos generados y de ser necesario, realizar ajustes en el diseño que aseguren no solo la viabilidad técnica y financiera del proceso, sino que también garanticen una gestión eficiente de los residuos plásticos y promuevan la tecnología de pirólisis en el ámbito de la transición energética.

### Referencias

- Aboulkas, A., El harfi, K., & El Bouadili, A. (2010). Thermal degradation behaviors of polyethylene and polypropylene. Part I: Pyrolysis kinetics and mechanisms. *Energy Conversion and Management*, 51(7), 1363–1369. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2009.12.017>
- Aisien, F. A., & Aisien, E. T. (2023). Production and characterization of liquid oil from the pyrolysis of waste high-density polyethylene plastics using spent fluid catalytic cracking catalyst. *Sustainable Chemistry for Climate Action*, 2, 100020. <https://doi.org/10.1016/J.SCCA.2023.100020>
- Akin, O., Varghese, R. J., Eschenbacher, A., Oenema, J., Abbas-Abadi, M. S., Stefanidis, G. D., & Van Geem, K. M. (2023). Chemical recycling of plastic waste to monomers: Effect of catalyst contact time, acidity and pore size on olefin recovery in ex-situ catalytic pyrolysis of polyolefin waste. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 172, 106036. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2023.106036>
- Almeida, D., & De Fátima Marques, M. (2016). Thermal and catalytic pyrolysis of plastic waste. *Polimeros*, 26(1), 44–51. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.2100>
- Al-Salem, S. M. (2018). Feedstock and optimal operation for plastics to fuel conversion in pyrolysis. In *Plastics to Energy: Fuel, Chemicals, and Sustainability Implications* (pp. 117–146). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813140-4.00005-4>
- Anene, A. F., Fredriksen, S. B., Sætre, K. A., & Tokheim, L. A. (2018). Experimental study of thermal and catalytic pyrolysis of plastic waste components. *Sustainability (Switzerland)*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/su10113979>
- Artetxe, M., Lopez, G., Amutio, M., Elordi, G., Bilbao, J., & Olazar, M. (2012). Light olefins from HDPE cracking in a two-step thermal and catalytic process. *Chemical Engineering Journal*, 207–208, 27–34. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.06.105>
- Bridgwater, A. V., & Peacocke, G. V. C. (2000). Fast pyrolysis processes for biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4(1), 1–73. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(99\)00007-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1364-0321(99)00007-6)
- Buekens, A. (2006). Introduction to Feedstock Recycling of Plastics. In *Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics* (pp. 1–41). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/0470021543.ch1>
- Camacho Flórez, J. S., & Arciniegas Hernández, J. J. (2024). *Diseño de una planta piloto de pirólisis orientada a la extracción selectiva de compuestos químicos con alta relevancia y valor agregado a*

*partir de polietileno de alta densidad (PEAD)*. Universidad Industrial de Santander.  
<https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/42346>

Chen, D., Yin, L., Wang, H., & He, P. (2014). Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. *Waste Management*, 34(12), 2466–2486.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.08.004>

CODINSA. (n.d.). *Cilindro Nitrógeno 10M3 - Codinsa*. Retrieved January 2, 2025, from  
<https://codinsa.cl/producto/cilindro-de-nitrogeno-10m3-cargado/>

Dai, L., Zhou, N., Lv, Y., Cheng, Y., Wang, Y., Liu, Y., Cobb, K., Chen, P., Lei, H., & Ruan, R. (2022). Pyrolysis technology for plastic waste recycling: A state-of-the-art review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 93, 101021. <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2022.101021>

Diaz Silvarrey, L. S., & Phan, A. N. (2016). Kinetic study of municipal plastic waste. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(37), 16352–16364. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2016.05.202>

DIMAC. (2024). *El valor del kilo de reciclaje en Colombia: ¿Cuánto puedes ganar por tus botellas PET? - fabrica de bolsas*. <https://botellaspet.com.co/cuanto-vale-el-kilo-de-reciclaje-en-colombia/>

Durán-García, M. E., & Ruiz-Navas, R. A. (2020). Simulator of thermodynamic properties in the conversion of forest biomass of pine sawdust. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 22(3), 347–364.  
<https://doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000309>

Dzięcioł, M., & Trzeczczynski, J. (2000). Volatile products of poly(ethylene terephthalate) thermal degradation in nitrogen atmosphere. *Journal of Applied Polymer Science*, 77(9), 1894–1901.  
[https://doi.org/https://doi.org/10.1002/1097-4628\(20000829\)77:9<1894::AID-APP5>3.0.CO;2-Y](https://doi.org/https://doi.org/10.1002/1097-4628(20000829)77:9<1894::AID-APP5>3.0.CO;2-Y)

Efika, C. E., Wu, C., & Williams, P. T. (2012). Syngas production from pyrolysis–catalytic steam reforming of waste biomass in a continuous screw kiln reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 95, 87–94. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2012.01.010>

ELECTRIFICADORA DE SANTANDER S.A. ESP. (2024). *Tarifas del mercado regulado*.  
<https://www.essa.com.co/site/Portals/0/documentos/mi-factura/tarifas/2024/Tarifa%20Octubre%202024.pdf>

Frączak, D., Fabiś, G., & Orlińska, B. (2021). Influence of the feedstock on the process parameters, product composition and pilot-scale cracking of plastics. *Materials*, 14(11).  
<https://doi.org/10.3390/MA14113094/S1>

- Gala, A., Catalán-Martínez, D., Guerrero, M., & Serra, J. M. (2021). Simulation-assisted design of a catalytic hydrogenation reactor for plastic pyrolysis fuels. *Fuel*, 287. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119400>
- Järvinen, A., Lehtoranta, K., Aakko-Saksa, P. T., Karppanen, M., Murtonen, T. T., Martikainen, J., Kuusisto, J., Nyyssönen, S., Koponen, P., Piimäkorpi, P., Friman, E., Orasuo, V., Rintanen, J., Jokiluoma, J., Kuittinen, N., & Rönkkö, T. (2023). Performance of a Wet Electrostatic Precipitator in Marine Applications. *Journal of Marine Science and Engineering*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:256860383>
- JORDÁN MORALES, W. D., & ZURITA GARCÉS, P. O. (2018). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR DE PIRÓLISIS TÉRMICA, PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS PLÁSTICOS DE POLIPROPILENO, GENERADOS EN LA ESPOCH*".
- Kassargy, C., Awad, S., Burnens, G., Kahine, K., & Tazerout, M. (2018). Gasoline and diesel-like fuel production by continuous catalytic pyrolysis of waste polyethylene and polypropylene mixtures over USY zeolite. *Fuel*, 224, 764–773. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.113>
- Li, A. M., Li, X. D., Li, S. Q., Ren, Y., Chi, Y., Yan, J. H., & Cen, K. F. (1999). Pyrolysis of solid waste in a rotary kiln: influence of final pyrolysis temperature on the pyrolysis products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 50(2), 149–162. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(99\)00025-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0165-2370(99)00025-X)
- López, A., de Marco, I., Caballero, B. M., Laresgoiti, M. F., Adrados, A., & Torres, A. (2011a). Pyrolysis of municipal plastic wastes II: Influence of raw material composition under catalytic conditions. *Waste Management*, 31(9), 1973–1983. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.05.021>
- López, A., de Marco, I., Caballero, B. M., Laresgoiti, M. F., Adrados, A., & Torres, A. (2011b). Pyrolysis of municipal plastic wastes II: Influence of raw material composition under catalytic conditions. *Waste Management*, 31(9), 1973–1983. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.05.021>
- Lopez, G., Artetxe, M., Amutio, M., Bilbao, J., & Olazar, M. (2017). Thermochemical routes for the valorization of waste polyolefinic plastics to produce fuels and chemicals. A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 346–368. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.01.142>
- Ma, Q. Y., Huang, Z., Ren, X., Zhao, J. J., Chen, F., & Teng, L. J. (2023). Effects of ZSM-5 zeolite on pyrolysis of polystyrene: from stabilizing to catalyzing. *Turkish Journal of Chemistry*, 47(4), 726–741. <https://doi.org/10.55730/1300-0527.3574>

- Manos, G., Garforth, A., & Dwyer, J. (2000). Catalytic degradation of high-density polyethylene over different zeolitic structures. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 39(5), 1198–1202. <https://doi.org/10.1021/ie990512q>
- McConville, F. X. . (2002). *The pilot plant real book : a unique handbook for the chemical process industry*. FXM Engineering and Design.
- Mejía Madrigal, S., & Upegui, S. (2021). *La pirólisis y otros métodos para el aprovechamiento de residuos de neumáticos como fuente de energía para la industria*.
- Mesa Puyo, D. (n.d.). *Transición energética: un legado para el presente y el futuro de Colombia Iván Duque Márquez Presidente de la República*. [www.laimprentaeditores.com](http://www.laimprentaeditores.com)
- Mesa Puyo, D. (2021). *Transición energética: un legado para el presente y el futuro de Colombia Iván Duque Márquez Presidente de la República*. [www.laimprentaeditores.com](http://www.laimprentaeditores.com)
- Miandad, R., Barakat, M. A., Aburizaiza, A. S., Rehan, M., Ismail, I. M. I., & Nizami, A. S. (2017). Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 119, 239–252. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.09.017>
- Miandad, R., Nizami, A. S., Rehan, M., Barakat, M. A., Khan, M. I., Mustafa, A., Ismail, I. M. I., & Murphy, J. D. (2016). Influence of temperature and reaction time on the conversion of polystyrene waste to pyrolysis liquid oil. *Waste Management*, 58, 250–259. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.023>
- Miandad, R., Rehan, M., Barakat, M. A., Aburizaiza, A. S., Khan, H., Ismail, I. M. I., Dhavamani, J., Gardy, J., Hassanpour, A., & Nizami, A. S. (2019). Catalytic pyrolysis of plastic waste: Moving toward pyrolysis based biorefineries. *Frontiers in Energy Research*, 7(MAR). <https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00027>
- Ministerio Ambiente y Desarrollo sostenible Colombia. (n.d.). *PLAN NACIONAL PARA LA MESA NACIONAL PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL PLÁSTICO SECRETARÍA TÉCNICA*.
- Miskolczi, N., Angyal, A., Bartha, L., & Valkai, I. (2009a). Fuels by pyrolysis of waste plastics from agricultural and packaging sectors in a pilot scale reactor. *Fuel Processing Technology*, 90(7), 1032–1040. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.04.019>
- Miskolczi, N., Angyal, A., Bartha, L., & Valkai, I. (2009b). Fuels by pyrolysis of waste plastics from agricultural and packaging sectors in a pilot scale reactor. *Fuel Processing Technology*, 90(7), 1032–1040. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.04.019>

- Onwudili, J. A., Muhammad, C., & Williams, P. T. (2019). Influence of catalyst bed temperature and properties of zeolite catalysts on pyrolysis-catalysis of a simulated mixed plastics sample for the production of upgraded fuels and chemicals. *Journal of the Energy Institute*, 92(5), 1337–1347. <https://doi.org/10.1016/J.JOEI.2018.10.001>
- Panqueva, H. (2024). *INFORME DE GESTIÓN EMAB CUARTO TRIMESTRE VIGENCIA*.
- Park, K. B., Jeong, Y. S., Guzelciftci, B., & Kim, J. S. (2020). Two-stage pyrolysis of polystyrene: Pyrolysis oil as a source of fuels or benzene, toluene, ethylbenzene, and xylenes. *Applied Energy*, 259. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114240>
- Peng, R., Qiushi, L., Wei, Z., & Peng, P. (2020). *Lifetime prediction and kinetic parameters of thermal decomposition of basin insulator by thermal analysis*. IEEE.
- Rehan, M., Miandad, R., Barakat, M. A., Ismail, I. M. I., Almeelbi, T., Gardy, J., Hassanpour, A., Khan, M. Z., Demirbas, A., & Nizami, A. S. (2017). Effect of zeolite catalysts on pyrolysis liquid oil. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 119, 162–175. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.11.015>
- Rodríguez Mendoza, F. (2015). *Simulación de un Proceso de Pirólisis de Plásticos empleando ASPEN – HYSYS*.
- Sahu, J. N., Mahalik, K. K., Nam, H. K., Ling, T. Y., Woon, T. S., Rahman, M. S. B. A., Mohanty, Y. K., Jayakumar, N. S., & Jamuar, S. S. (2014). Feasibility study for catalytic cracking of waste plastic to produce fuel oil with reference to Malaysia and simulation using ASPEN Plus. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 33(1), 298–307. <https://doi.org/10.1002/ep.11748>
- Shah, H. H., Amin, M., Iqbal, A., Nadeem, I., Kalin, M., Soomar, A. M., & Galal, A. M. (2023). A review on gasification and pyrolysis of waste plastics. In *Frontiers in Chemistry* (Vol. 10). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.960894>
- Sharuddin, S. D. A., Abnisa, F., Daud, W. M. A. W., & Aroua, M. K. (2018). Pyrolysis of plastic waste for liquid fuel production as prospective energy resource. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 334, 012001. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/334/1/012001>
- Syamsiro, M., Saptoadi, H., Norsujianto, T., Noviasri, P., Cheng, S., Alimuddin, Z., & Yoshikawa, K. (2014). Fuel Oil Production from Municipal Plastic Wastes in Sequential Pyrolysis and Catalytic Reforming Reactors. *Energy Procedia*, 47, 180–188. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.212>

- Sylvia, N., Husin, H., Muslim, A., Yunardi, Syahrullah, A., Purnomo, H., Dewi, R., & Bindar, Y. (2023). Design and performance of a cyclone separator integrated with a bottom ash bed for the removal of fine particulate matter in a palm oil mill: A simulation study. *AIMS Environmental Science*, *10*(3), 341–355. <https://doi.org/10.3934/environsci.2023020>
- Tang, C., Wang, Y.-Z., Zhou, Q., & Zheng, L. (2003). Catalytic effect of Al–Zn composite catalyst on the degradation of PVC-containing polymer mixtures into pyrolysis oil. *Polymer Degradation and Stability*, *81*(1), 89–94. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(03\)00066-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0141-3910(03)00066-1)
- Undri, A., Meini, S., Rosi, L., Frediani, M., & Frediani, P. (2013). Microwave pyrolysis of polymeric materials: Waste tires treatment and characterization of the value-added products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *103*, 149–158. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.11.011>
- Wang, Z., Xie, T., Ning, X., Liu, Y., & Wang, J. (2019). Thermal degradation kinetics study of polyvinyl chloride (PVC) sheath for new and aged cables. *Waste Management*, *99*, 146–153. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2019.08.042>
- Williams, P. T., & Williams, E. A. (1999). Product Composition from the Fast Pyrolysis of Polystyrene. *Environmental Technology*, *20*(11), 1109–1118. <https://doi.org/10.1080/09593332008616908>
- Xayachak, T., Haque, N., Parthasarathy, R., King, S., Emami, N., Lau, D., & Pramanik, B. K. (2022a). Pyrolysis for plastic waste management: An engineering perspective. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *10*(6), 108865. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108865>
- Xayachak, T., Haque, N., Parthasarathy, R., King, S., Emami, N., Lau, D., & Pramanik, B. K. (2022b). Pyrolysis for plastic waste management: An engineering perspective. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *10*(6), 108865. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108865>
- Yousef, S., Eimontas, J., Striūgas, N., Mohamed, A., & Ali Abdelnaby, M. (2023). Pyrolysis Kinetic Behavior and Thermodynamic Analysis of PET Nonwoven Fabric. *Materials (Basel, Switzerland)*, *16*(18). <https://doi.org/10.3390/MA16186079>
- Zevenhoven, R., Axelsen, E. P., & Hupa, M. (2002). Pyrolysis of waste-derived fuel mixtures containing PVC. *Fuel*, *81*(4), 507–510. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00168-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00168-5)

## Apéndices

### Apéndice A. Ecuaciones para el cálculo de la cinética de reacción

Utilizando la ecuación cinética de materiales sólidos en condiciones no isotérmicas, como se muestra en la ecuación (2):

$$\frac{d\alpha}{dT} = \left(\frac{A}{\beta}\right) \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) f(\alpha) \quad (Ec. 2)$$

Donde  $\alpha$  representa la tasa de conversión, A representa el factor de frecuencia, E representa la energía de activación, R representa la constante del gas y  $\beta$  representa la tasa de calentamiento.  $f(\alpha)$  es la función del mecanismo de reacción, que caracteriza una determinada relación entre la tasa de reacción de la sustancia y la tasa de conversión  $\alpha$ . Los resultados del análisis TGA permitieron obtener los datos de la tasa de calentamiento y la tasa de conversión en el tiempo.

Al tenerse datos de  $\beta$ , se determina la energía de activación mediante el uso de la aproximación de Doyle, mostrada en la ecuación (3)

$$\ln \beta = \ln\left(\frac{AE}{RG(\alpha)}\right) - 5.3305 - 1.0516 \frac{E}{RT} \quad (Ec. 3)$$

Como esta corresponde a la linealización del logaritmo de  $\beta$  dependiente de la temperatura, se realizan cálculos de este logaritmo neperiano y se grafican los datos obtenidos respecto al recíproco de la temperatura para cada uno de los cambios en la tasa de conversión en el rango de [0.2-0.8], con el fin de obtener la ecuación lineal para cada uno de los cambios de  $\alpha$ .

Partiendo de las ecuaciones linealizadas, la pendiente de cada una corresponde a  $-1.0516 \frac{E}{RT}$ , presente en la ecuación (2), de lo cual se despeja la energía de activación considerando una constante de los gases igual a 8.314 [J/K·mol]. Los datos de  $f(\alpha)$  se obtienen despejándolos de la ecuación (2), debido a que se conocen los demás parámetros cinéticos presentes en la ecuación. Sin embargo, para la obtención del modelo cinético se utilizó programación en lenguaje Python. El código utilizado se encuentra en el anexo 2.

**Apéndice B. Código para la determinación del modelo cinético**

```
import NumPy as np
from SciPy. Optimize import curve_fit
import matplotlib.pyplot as plt
# Define the power model function
def power_model(x, a, b):
    return a * np.power(x, b)

# Given data
x = np.array([0.95, 0.94, 0.93, 0.92, 0.91, 0.90, 0.89, 0.88, 0.87, 0.86, 0.85, 0.84, 0.83, 0.82,
0.81, 0.80, 0.79, 0.78, 0.77, 0.76, 0.75, 0.74, 0.73, 0.72, 0.71, 0.70, 0.69, 0.68, 0.67, 0.66, 0.65,
0.64, 0.63, 0.62, 0.61, 0.60, 0.59, 0.58, 0.57, 0.56, 0.55, 0.54, 0.53, 0.52, 0.51, 0.50, 0.49, 0.48,
0.47, 0.46, 0.45, 0.44, 0.43, 0.42, 0.41, 0.40, 0.39, 0.38, 0.37, 0.36, 0.35, 0.34, 0.33, 0.32, 0.31,
0.30, 0.29, 0.28, 0.27, 0.26, 0.25, 0.24, 0.23, 0.22, 0.21, 0.20, 0.19, 0.18, 0.17, 0.16, 0.15, 0.14,
0.13, 0.12, 0.11, 0.10, 0.09, 0.08, 0.07, 0.06, 0.05, 0.04])
fx = np.array([-2.79787, -2.76888, -2.66820, -2.62329, -2.53521, -2.43664, -2.38645, -
2.23873, -2.18558, -2.00118, -2.00290, -1.92128, -1.88443, -1.83143, -1.69192, -1.65146, -
1.61272, -1.52498, -1.47578, -1.34508, -1.34951, -1.27557, -1.22834, -1.11397, -1.13411, -
1.06614, -1.03335, -0.93582, -0.93588, -0.88748, -0.82690, -0.78512, -0.78191, -0.71117, -
0.65936, -0.62852, -0.58919, -0.56213, -0.53349, -0.50125, -0.48732, -0.45300, -0.43072, -
0.40382, -0.37558, -0.36059, -0.33227, -0.30785, -0.28795, -0.26473, -0.24267, -0.22124, -
0.20555, -0.18368, -0.16791, -0.14822, -0.13051, -0.11421, -0.09896, -0.08388, -0.07185, -
0.05853, -0.04750, -0.03690, -0.02573, -0.01406, -0.00154, -0.00031, -0.00007, -0.00001])

# Fit the power model to the data
params, covariance = curve_fit(power_model, x, fx)
# Extract the coefficients a and b
a, b = params

# Calculate R-squared
residuals = fx - power_model(x, a, b)
ss_res = np.sum(residuals**2)
```

```
ss_tot = np.sum((fx - np.mean(fx))**2)
r_squared = 1 - (ss_res / ss_tot)
# Print the coefficients and R-squared
print(f"Coefficient a: {a}")
print(f"Coefficient b: {b}")
print(f"R-squared: {r_squared}")

# Plot the data and the fitted model
plt.scatter(x, fx, label='Data')
plt.plot(x, power_model(x, a, b), label=f'Fitted model: f(x)={a:.2f}*x^{b:.2f}', color='red')
plt.xlabel('x')
plt.ylabel('f(x)')
plt.legend()
plt.show()
```

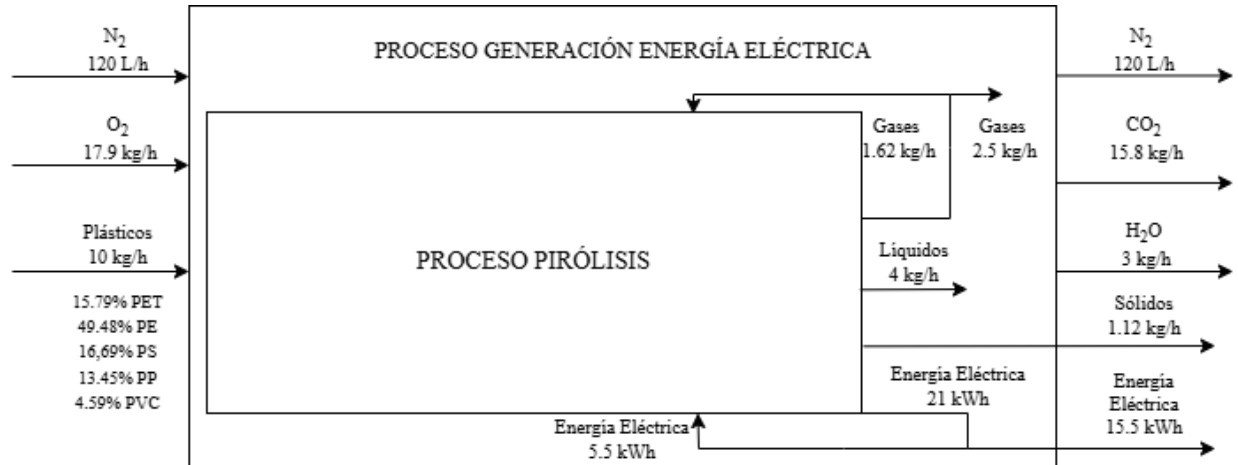
Apéndice C. Corrientes del proceso

Tabla 16

Corrientes del proceso de pirólisis de residuos plásticos obtenidas en Aspen Plus

Corriente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Salida			T10 3	B10 1	R10 1	F10 1	HE1 01	F101	HE1 01	FS1 01	FS1 01	S10 1	HE 102	HE1 02		HE1 03	B10 2	HE 103	S10 1	
Entrada	T103	T103	B10 1	HE1 01	F10 1	HE1 01	R10 1		FS1 01	HE1 02	S10 1	HE1 03	HE 103		HE 102	B10 2			T10 3	
Temperatura [°C]	25	25	48.2 7	38.2 6	500. 00	505. 00	367. 73	505. 00	120	120	120	120	29.4 7	30	25	40	57.1 49	32.7 48	120	
Presión [Bar]	1	1	2	2.02 7	2	1.5	2.02 7	1.5	1.5	1.8	1.8	1.8	1.01 3	1.8	1.01 3	1.8	2	1.01 3	1.8	
Flujo [kg/h]	5	1	8.43 1	8.43 1	8.43 1	7.27 3	8.43 1	1.15 8	7.27 3	2.41 2	4.86 1	2.43 1	20	2.41 2	20	2.43 1	2.43 1	20	2.43 1	
Fracciones másicas	CO	-	6.4E -02	6.4E -02	1.3E -01	1.5E -01	6.4E -02	-	1.5E -01	4.1E -05	2.2E -01	2.2E -01	-	4.1E -05	-	2.2E -01	2.2E -01	-	2.2E -01	
	CH4	-	9.8E -03	9.8E -03	2.0E -02	2.3E -02	9.8E -03	-	2.3E -02	1.2E -05	3.4E -02	3.4E -02	-	1.2E -05	-	3.4E -02	3.4E -02	-	3.4E -02	
	C2H6	-	6.0E -03	6.0E -03	1.2E -02	1.4E -02	6.0E -03	-	1.4E -02	3.4E -05	2.1E -02	2.1E -02	-	3.4E -05	-	2.1E -02	2.1E -02	-	2.1E -02	
	C3H6	-	1.4E -02	1.4E -02	2.8E -02	3.2E -02	1.4E -02	-	3.2E -02	2.1E -04	4.8E -02	4.8E -02	-	2.1E -04	-	4.8E -02	4.8E -02	-	4.8E -02	
	C3H8	-	4.3E -03	4.3E -03	8.5E -03	9.9E -03	4.3E -03	-	9.9E -03	7.7E -05	1.5E -02	1.5E -02	-	7.7E -05	-	1.5E -02	1.5E -02	-	1.5E -02	
	C4H8	-	3.8E -03	3.8E -03	7.6E -03	8.8E -03	3.8E -03	-	8.8E -03	2.0E -04	1.3E -02	1.3E -02	-	2.0E -04	-	1.3E -02	1.3E -02	-	1.3E -02	
	C4H10	-	2.4E -03	2.4E -03	4.9E -03	5.7E -03	2.4E -03	-	5.7E -03	1.2E -04	8.5E -03	8.5E -03	-	1.2E -04	-	8.5E -03	8.5E -03	-	8.5E -03	
	C5H10	-	4.6E -03	4.6E -03	9.4E -03	1.1E -02	4.6E -03	-	1.1E -02	4.8E -04	1.6E -02	1.6E -02	-	4.8E -04	-	1.6E -02	1.6E -02	-	1.6E -02	
	C6H12	-	3.5E -03	3.5E -03	7.2E -03	8.4E -03	3.5E -03	-	8.4E -03	8.3E -04	1.2E -02	1.2E -02	-	8.3E -04	-	1.2E -02	1.2E -02	-	1.2E -02	
	CO2	-	4.8E -02	4.8E -02	9.6E -02	1.1E -01	4.8E -02	-	1.1E -01	1.5E -04	1.7E -01	1.7E -01	-	1.5E -04	-	1.7E -01	1.7E -01	-	1.7E -01	
	C10H8	-	3.0E -03	3.0E -03	5.2E -02	6.1E -02	3.0E -03	-	6.1E -02	1.6E -01	1.0E -02	1.0E -02	-	1.6E -01	-	1.0E -02	1.0E -02	-	1.0E -02	
	C12H10	-	9.0E -04	9.0E -04	2.2E -02	2.5E -02	9.0E -04	-	2.5E -02	7.0E -03	3.1E -03	3.1E -03	-	7.0E -03	-	3.1E -03	3.1E -03	-	3.1E -03	
	C14H10	-	8.3E -05	8.3E -05	2.8E -02	3.2E -02	8.3E -05	-	3.2E -02	9.6E -04	2.9E -04	2.9E -04	-	9.6E -04	-	2.9E -04	2.9E -04	-	2.9E -04	
	C6H6O	-	5.8E -03	5.8E -03	2.6E -02	3.0E -02	5.8E -03	-	3.0E -02	5.0E -02	2.0E -02	2.0E -02	-	5.0E -02	-	2.0E -02	2.0E -02	-	2.0E -02	
	C8H6O4	-	3.4E -05	3.4E -05	9.5E -02	1.1E -01	3.4E -05	-	1.1E -01	3.3E -01	1.2E -04	1.2E -04	-	3.3E -01	-	1.2E -04	1.2E -04	-	1.2E -04	
	C29H50O	-	6.7E -09	6.7E -09	3.0E -02	3.5E -02	6.7E -09	-	3.5E -02	1.1E -01	2.3E -08	2.3E -08	-	1.1E -01	-	2.3E -08	2.3E -08	-	2.3E -08	
	C29H48O	-	8.2E -09	8.2E -09	3.6E -02	4.2E -02	8.2E -09	-	4.2E -02	1.3E -01	2.9E -08	2.9E -08	-	1.3E -01	-	2.9E -08	2.9E -08	-	2.9E -08	
	C18H14	-	6.1E -06	6.1E -06	1.6E -02	1.9E -02	6.1E -06	-	1.9E -02	5.6E -02	2.1E -05	2.1E -05	-	5.6E -02	-	2.1E -05	2.1E -05	-	2.1E -05	
	H2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	-	-	1	-
	C	-	-	-	-	1.4E -01	1.6E -06	-	1.0E +00	1.6E -06	4.8E -06	-	-	-	4.8E -06	-	-	-	-	-
PSW	1.0E +00	-	5.9E -01	5.9E -01	-	-	5.9E -01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
N2	-	1.0E +00	2.4E -01	2.4E -01	2.4E -01	2.7E -01	2.4E -01	-	2.7E -01	7.3E -05	4.1E -01	4.1E -01	-	7.3E -05	-	4.1E -01	4.1E -01	-	4.1E -01	

Nota. Esta tabla muestra los compuestos del proceso con las características más importantes de cada corriente: temperatura, flujo, composición y presión.

**Figura 11***Diagrama de entradas y salidas*

*Nota.* Esta figura muestra el diagrama de entrada y salida del proceso, donde se encuentran los principales compuestos presentes en el proceso con sus flujos y composiciones.

**Tabla 17**

Listado de compuestos del proceso de pirólisis

Compuesto	Temperatura de ebullición [°C]	Destino	Compuesto	Temperatura de ebullición [°C]	Destino
PE*	475	Reactivo	Dióxido de carbono	109.3	Reciclo y purga
Estigmasta-5,24(28)-dien-3-ol	430	Producto Principal	Agua	100	Reciclo y purga
PP*	425	Reactivo	Hexano	63	Combustible
PS*	355	Reactivo	1-Penteno	30	Combustible
Beta-sitosterol	351	Producto Principal	Butano	-0.5	Combustible
Fenantreno	332	Producto Principal	Buteno	-6.3	Combustible
Terfenilo, 5'-fenil	307	Producto Principal	Propano	-42.1	Combustible
Ácido 1,2-bencenodicarboxílico	295	Producto Principal	Propeno	-47.6	Combustible
PVC*	280	Reactivo	Etano	-88.6	Combustible
PET*	260	Reactivo	Metano	-161.5	Combustible
Bifenilo	255	Producto Principal	Oxígeno	-183	Reactivo
Azuleno	242	Producto Principal	Monóxido de carbono	-191.5	Reciclo y purga
Fenol	181.7	Producto Principal	Nitrógeno molecular	-195.79	Reciclo y purga

\*Compuesto muestra la Temperatura de descomposición.

*Nota.* Esta tabla muestra el listado de compuestos de entrada y salida del proceso, así como sus temperaturas de descomposición y destinos en el proceso.

## Apéndice D. Cálculos financieros

Tabla 18

Costos de capital de la planta de procesamiento de residuos plásticos.

Equipos	Capex Min [USD]	Capex Max [USD]	Factor materia l	Estado	Costo real min sin transporte [USD]	Costo real Max sin transporte [USD]	Costo real Min sin transporte [COP]	Costo real Max sin transporte [COP]
Tanque Almt. (T101)	\$ 7.68	\$ 7.68	1	Sólidos	\$ 34.00	\$ 34.00	COP 141,903.08	COP 158,931.45
Triturador (G101)	\$ 55.00	\$ 250.00	1	Sólidos	\$ 242.00	\$ 1,100.00	COP 1,010,016.04	COP 5,141,899.84
Tanque Almt. (T102)	\$ 45.00	\$ 100.00	1	Sólidos	\$ 198.00	\$ 440.00	COP 826,376.76	COP 2,056,759.94
Tanque Almt. (T103)	\$ 45.00	\$ 150.00	1	Sólidos	\$ 198.00	\$ 660.00	COP 826,376.76	COP 3,085,139.90
Tanque Almt. (T104)	\$ 60.00	\$ 120.00	1	Fluidos	\$ 330.00	\$ 660.00	COP 1,377,294.60	COP 3,085,139.90
Tanque Almt. (T105)	\$ 60.00	\$ 120.00	2	Fluidos	\$ 201.00	\$ 402.00	COP 838,897.62	COP 1,879,130.67
Soplador (B101)	\$ 1,500	\$ 2,000.00	1	Fluidos	\$ 8,250.00	\$ 11,000.00	COP 34,432,365.00	COP 51,418,998.40
Filtro Solidos (F101)	\$ 150.0	\$ 400.00	1	Fluidos-Sólidos	\$ 660.00	\$ 1,760.00	COP 2,754,589.20	COP 8,227,039.74
Filtro heteroatomos (F102)	\$ 500.0	\$ 1,000.00	1.3	Fluidos-Sólidos	\$ 1,831.00	\$ 3,662.00	COP 7,641,898.22	COP 17,117,852.01
Intercambiador de calor (HE101)	\$ 189.0	\$ 329.00	1	Fluidos	\$ 1,040.00	\$ 1,810.00	COP 4,340,564.80	COP 8,460,762.46
Flash (FS101)	\$ 11,722.29	\$ 11,722.29	1	Fluidos	\$ 64,473.00	\$ 64,473.00	COP 269,085,802.26	COP 301,376,098.53
Generador eléctrico para gases (G101)	\$ 500.00	\$ 4,000.00	1.3	Fluidos	\$ 2,254.00	\$ 18,031.00	COP 9,407,339.48	COP 84,285,087.29
Reactor tornillo (R101)	\$ 306.39	\$ 1,300.00	1.3	Fluidos-Sólidos	\$ 1,122.00	\$ 4,760.00	COP 4,682,801.64	COP 22,250,402.94
Reactor de lecho fluidizado (R102)	\$ 3,500.00	\$ 3,500.00	1.3	Fluidos-Sólidos	\$ 12,816.00	\$ 12,816.00	COP 53,489,113.92	COP 59,907,807.59
Cinta de transporte	\$ 52.48	\$ 157.44	3	Sólidos	\$ 119.00	\$ 357.00	COP 496,660.78	COP 1,668,780.22
Cilindro de N <sub>2</sub> (C101)	\$ 110.0	\$ 110.00	1.1	Fluidos	\$ 562.00	\$ 562.00	COP 2,345,574.44	COP 2,627,043.37
Total					\$ 94,330.00			

Nota. Esta tabla muestra de forma detallada los costos de cada uno de los equipos de la planta.

**Tabla 19***Costos de materias primas y venta de energía eléctrica*

Compuesto	Cantidad	[COP/kg]	USD	Precio [USD/h]	Cita
Plásticos [kg/h]	10	COP 200.00	\$ 0.05	\$ 0.49	(DIMAC, 2024)
N <sub>2</sub> [L/h]	120	COP 5.50	\$ 0.00	\$ 0.16	(CODINSA, n.d.)
Energía Eléctrica [kWh]	15.25	COP 945.03	\$ 0.23	\$ 3.50	(Electrificadora De Santander S.A., 2024)

*Nota.* Esta tabla muestra los costos de materias primas usadas en el proceso, así como los ingresos generados por la venta de energía eléctrica producida.

**Tabla 20***Costos de servicios industriales*

	Costo servicios industriales [USD/h]	Costo servicios industriales [USD/día]	Costo servicios industriales [USD/mes]	Costo servicios industriales [USD/año]
Agua	\$ 0.04	\$ 0.93	\$ 27.87	\$ 317.42

*Nota.* Esta tabla muestra el costo del servicio de agua industrial requerida en el proceso.

**Tabla 21***Energía producida por la planta piloto*

Energía producida a partir de gases [kWh]	5.513	Energía total requerida del proceso [kWh]	5.505	Energía sobrante [kWh]	0.00863
---	-------	---	-------	------------------------	---------

*Nota.* Esta tabla muestra los datos de energía producida a partir de los gases generados en el proceso y el consumo energético requerido por la planta.

**Tabla 22***Costos de inversión*

INVERSIONES FIJAS	\$ 58,188.62
DEPRECIABLES	\$ 58,188.62
MAQUINARIA Y EQUIPO	\$ 58,188.62
INVERSIONES DIFERIDAS	\$ 4,850.84
IMPREVISTOS	\$ 4,850.84
CAPITAL DE TRABAJO	\$ 1,212.71
INVENTARIO DE MATERIA PRIMA	\$ 1,212.71
FLUJO DE INVERSION	\$ 64,252.17

*Nota.* Esta tabla muestra los costos asociados a la inversión y puesta en marcha de la planta.

**Tabla 23***Flujos de caja del proceso.*

PERIODOS	FLUJO DE INVERSION	FLUJO DE PRODUCCION	FLUJO NETO DE CAJA
0	\$-64,252.17	\$ -	\$-64,252.17
1	\$ -	\$ 11,960.60	\$ 11,960.60
2	\$ -	\$ 12,349.50	\$ 12,349.50
3	\$ -	\$ 12,750.82	\$ 12,750.82
4	\$ -	\$ 13,164.82	\$ 13,164.82
5	\$ -	\$ 13,591.77	\$ 13,591.77
6	\$ -	\$ 14,031.92	\$ 14,031.92
7	\$ -	\$ 14,485.50	\$ 14,485.50
8	\$ -	\$ 14,952.74	\$ 14,952.74
9	\$ -	\$ 15,433.86	\$ 15,433.86
10	\$ -	\$ 15,929.04	\$ 15,929.04
11	\$ -	\$ 16,438.48	\$ 16,438.48
12	\$ -	\$ 16,962.31	\$ 16,962.31
13	\$ -	\$ 17,500.67	\$ 17,500.67
14	\$ -	\$ 18,053.65	\$ 18,053.65
15	\$ -	\$ 18,621.32	\$ 18,621.32
16	\$ -	\$ 19,203.70	\$ 19,203.70
17	\$ -	\$ 19,800.78	\$ 19,800.78
18	\$ -	\$ 20,412.48	\$ 20,412.48
19	\$ -	\$ 21,038.70	\$ 21,038.70
20	\$ 2,212.71	\$ 21,679.25	\$ 22,891.96

*Nota.* La tabla muestra los flujos de cada con sus respectivos ingresos y egresos para los 20 años de duración del proceso.

**Tabla 24***Criterios financieros*

HORIZONTE	IMPUESTO DE RENTA	TMAR	CRÉDITO
20	35%	12%	0
CRITERIOS FINANCIEROS SIN ENDEUDAMIENTO			
VPN [USD]	TIR	PAYBACK	PB DESCONTADO
\$45,494.55	21.09%	6	8

*Nota.* La tabla muestra los criterios financieros que se tuvieron en cuenta al momento de realizar los cálculos financieros

**Tabla 25***Análisis de sensibilidad con escenario negativo*

SENSIBILIDAD ESCENARIO NEGATIVO																					
43,056	0.0%	-0.80%	-1.6%	-2.40%	-3.2%	-4.00%	-4.8%	-5.60%	-6.4%	-7.20%	-8.0%	-8.80%	-9.6%	10.40%	-11.2%	12.00%	-12.8%	13.60%	-14.4%	15.20%	-16.0%
0.00%	45,495	43,105	40,715	38,325	35,935	33,545	31,155	28,766	26,376	23,986	21,596	19,206	16,816	14,426	12,037	9,647	7,257	4,867	2,477	87	2,303
0.80%	43,983	41,593	39,203	36,813	34,423	32,033	29,644	27,254	24,864	22,474	20,084	17,694	15,304	12,915	10,525	8,135	5,745	3,355	965	1,425	3,814
1.60%	42,471	40,081	37,691	35,301	32,911	30,522	28,132	25,742	23,352	20,962	18,572	16,182	13,793	11,403	9,013	6,623	4,233	1,843	547	2,936	5,326
2.40%	40,959	38,569	36,179	33,789	31,399	29,010	26,620	24,230	21,840	19,450	17,060	14,671	12,281	9,891	7,501	5,111	2,721	331	2,058	4,448	6,838
3.20%	39,447	37,057	34,667	32,277	29,888	27,498	25,108	22,718	20,328	17,938	15,548	13,159	10,769	8,379	5,989	3,599	1,209	1,180	3,570	5,960	8,350
4.00%	37,935	35,545	33,155	30,766	28,376	25,986	23,596	21,206	18,816	16,426	14,037	11,647	9,257	6,867	4,477	2,087	303	2,692	5,082	7,472	9,862
4.80%	36,423	34,033	31,644	29,254	26,864	24,474	22,084	19,694	17,304	14,915	12,525	10,135	7,745	5,355	2,965	575	1,814	4,204	6,594	8,984	11,374
5.60%	34,911	32,522	30,132	27,742	25,352	22,962	20,572	18,182	15,793	13,403	11,013	8,623	6,233	3,843	1,453	936	3,326	5,716	8,106	10,496	12,886
6.40%	33,400	31,010	28,620	26,230	23,840	21,450	19,060	16,671	14,281	11,891	9,501	7,111	4,721	2,331	58	2,448	4,838	7,228	9,618	12,008	14,398
7.20%	31,888	29,498	27,108	24,718	22,328	19,938	17,549	15,159	12,769	10,379	7,989	5,599	3,209	820	1,570	3,960	6,350	8,740	11,130	13,520	15,909
8.00%	30,376	27,986	25,596	23,206	20,816	18,426	16,037	13,647	11,257	8,867	6,477	4,087	1,698	692	3,082	5,472	7,862	10,252	12,642	15,031	17,421
8.80%	28,864	26,474	24,084	21,694	19,304	16,915	14,525	12,135	9,745	7,355	4,965	2,575	186	2,204	4,594	6,984	9,374	11,764	14,153	16,543	18,933
9.60%	27,352	24,962	22,572	20,182	17,793	15,403	13,013	10,623	8,233	5,843	3,453	1,064	1,326	3,716	6,106	8,496	10,886	13,276	15,665	18,055	20,445
10.40%	25,840	23,450	21,060	18,671	16,281	13,891	11,501	9,111	6,721	4,331	1,942	448	2,838	5,228	7,618	10,008	12,398	14,787	17,177	19,567	21,957
11.20%	24,328	21,938	19,549	17,159	14,769	12,379	9,989	7,599	5,209	2,820	430	1,960	4,350	6,740	9,130	11,520	13,909	16,299	18,689	21,079	23,469
12.00%	22,816	20,427	18,037	15,647	13,257	10,867	8,477	6,087	3,698	1,308	1,082	3,472	5,862	8,252	10,642	13,031	15,421	17,811	20,201	22,591	24,981
12.80%	21,304	18,915	16,525	14,135	11,745	9,355	6,965	4,576	2,186	204	2,594	4,984	7,374	9,764	12,153	14,543	16,933	19,323	21,713	24,103	26,493
13.60%	19,793	17,403	15,013	12,623	10,233	7,843	5,453	3,064	674	1,716	4,106	6,496	8,886	11,275	13,665	16,055	18,445	20,835	23,225	25,615	28,004
14.40%	18,281	15,891	13,501	11,111	8,721	6,331	3,942	1,552	838	3,228	5,618	8,008	10,398	12,787	15,177	17,567	19,957	22,347	24,737	27,126	29,516
15.20%	16,769	14,379	11,989	9,599	7,209	4,820	2,430	40	2,350	4,740	7,130	9,520	11,909	14,299	16,689	19,079	21,469	23,859	26,249	28,638	31,028
16.00%	15,257	12,867	10,477	8,087	5,698	3,308	918	1,472	3,862	6,252	8,642	11,031	13,421	15,811	18,201	20,591	22,981	25,371	27,760	30,150	32,540

*Nota.* La tabla muestra la variación de las ganancias del proceso para diferentes escenarios en los que se disminuyen los ingresos y se aumentan los egresos.

**Tabla 26***Análisis de sensibilidad con escenario positivo.*

SENSIBILIDAD ESCENARIO POSITIVO																					
47,933	0.0%	0.8%	1.6%	2.4%	3.2%	4.0%	4.8%	5.6%	6.4%	7.2%	8.0%	8.8%	9.6%	10.4%	11.2%	12.0%	12.8%	13.6%	14.4%	15.2%	16.0%
0.00%	45,495	47,884	50,274	52,664	55,054	57,444	59,834	62,224	64,613	67,003	69,393	71,783	74,173	76,563	78,952	81,342	83,732	86,122	88,512	90,902	93,292
-0.80%	47,006	49,396	51,786	54,176	56,566	58,956	61,346	63,735	66,125	68,515	70,905	73,295	75,685	78,075	80,464	82,854	85,244	87,634	90,024	92,414	94,804
-1.60%	48,518	50,908	53,298	55,688	58,078	60,468	62,857	65,247	67,637	70,027	72,417	74,807	77,197	79,586	81,976	84,366	86,756	89,146	91,536	93,926	96,315
-2.40%	50,030	52,420	54,810	57,200	59,590	61,979	64,369	66,759	69,149	71,539	73,929	76,319	78,708	81,098	83,488	85,878	88,268	90,658	93,048	95,437	97,827
-3.20%	51,542	53,932	56,322	58,712	61,101	63,491	65,881	68,271	70,661	73,051	75,441	77,830	80,220	82,610	85,000	87,390	89,780	92,170	94,559	96,949	99,339
-4.00%	53,054	55,444	57,834	60,224	62,613	65,003	67,393	69,783	72,173	74,563	76,952	79,342	81,732	84,122	86,512	88,902	91,292	93,681	96,071	98,461	100,851
-4.80%	54,566	56,956	59,346	61,735	64,125	66,515	68,905	71,295	73,685	76,075	78,464	80,854	83,244	85,634	88,024	90,414	92,803	95,193	97,583	99,973	102,363
-5.60%	56,078	58,468	60,857	63,247	65,637	68,027	70,417	72,807	75,197	77,586	79,976	82,366	84,756	87,146	89,536	91,926	94,315	96,705	99,095	101,485	103,875
-6.40%	57,590	59,979	62,369	64,759	67,149	69,539	71,929	74,319	76,708	79,098	81,488	83,878	86,268	88,658	91,048	93,437	95,827	98,217	100,607	102,997	105,387
-7.20%	59,101	61,491	63,881	66,271	68,661	71,051	73,441	75,830	78,220	80,610	83,000	85,390	87,780	90,170	92,559	94,949	97,339	99,729	102,119	104,509	106,899
-8.00%	60,613	63,003	65,393	67,783	70,173	72,563	74,952	77,342	79,732	82,122	84,512	86,902	89,292	91,681	94,071	96,461	98,851	101,241	103,631	106,021	108,410
-8.80%	62,125	64,515	66,905	69,295	71,685	74,074	76,464	78,854	81,244	83,634	86,024	88,414	90,803	93,193	95,583	97,973	100,363	102,753	105,143	107,532	109,922
-9.60%	63,637	66,027	68,417	70,807	73,197	75,586	77,976	80,366	82,756	85,146	87,536	89,925	92,315	94,705	97,095	99,485	101,875	104,265	106,654	109,044	111,434
-10.40%	65,149	67,539	69,929	72,319	74,708	77,098	79,488	81,878	84,268	86,658	89,048	91,437	93,827	96,217	98,607	100,997	103,387	105,776	108,166	110,555	112,944
-11.20%	66,661	69,051	71,441	73,830	76,220	78,610	81,000	83,390	85,780	88,170	90,559	92,949	95,339	97,729	100,119	102,509	104,899	107,288	109,678	112,068	114,458
-12.00%	68,173	70,563	72,952	75,342	77,732	80,122	82,512	84,902	87,292	89,681	92,071	94,461	96,851	99,241	101,631	104,021	106,410	108,800	111,190	113,580	115,970
-12.80%	69,685	72,074	74,464	76,854	79,244	81,634	84,024	86,414	88,803	91,193	93,583	95,973	98,363	100,753	103,143	105,532	107,922	110,312	112,702	115,092	117,482
-13.60%	71,197	73,586	75,976	78,366	80,756	83,146	85,536	87,925	90,315	92,705	95,095	97,485	99,875	102,265	104,654	107,044	109,434	111,824	114,214	116,604	118,994
-14.40%	72,708	75,098	77,488	79,878	82,268	84,658	87,048	89,437	91,827	94,217	96,607	98,997	101,387	103,776	106,166	108,555	110,944	113,334	115,724	118,114	120,504
-15.20%	74,220	76,610	79,000	81,390	83,780	86,170	88,559	90,949	93,339	95,729	98,119	100,509	102,899	105,288	107,678	110,068	112,458	114,848	117,238	119,628	122,018
-16.00%	75,732	78,122	80,512	82,902	85,292	87,681	90,071	92,461	94,851	97,241	99,631	102,021	104,410	106,800	109,190	111,580	113,970	116,360	118,750	121,140	123,530

*Nota.* La tabla muestra la variación de las ganancias del proceso para diferentes escenarios en los que se aumentan los ingresos y se disminuyen los egresos.

**Apéndice E. Hojas de especificaciones de los equipos****Tabla 27**

Especificaciones del tanque de almacenamiento T101

TABLA DE ESPECIFICACIONES TANQUE DE ALMACENAMIENTO			
Nombre del equipo	Tanque		
Tipo	Almacenamiento		
Identificación	T-101		
Datos técnicos y de operación			
Flujo	Residuos plásticos		
Temperatura de operación	25	°C	
Presión de operación	1	bar	
Temperatura de diseño	30	°C	
Presión de diseño	1	bar	
Capacidad	80	L	
Diámetro	45	cm	
Alto	49.5	cm	
Material	Polietileno		
Notas			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cumple con las normativas ASME y API para almacenamiento seguro.</li> <li>• Instalación sobre base nivelada y anclajes.</li> <li>• Accesorios incluidos: Tapa hermética, asas reforzadas.</li> <li>• Garantía de 5 años contra defectos de fabricación</li> </ul>			

*Nota.* Esta tabla muestra las especificaciones de diseño y operación del tanque de almacenamiento T101.

**Tabla 28***Especificaciones del tanque de almacenamiento T102*

TABLA DE ESPECIFICACIONES TANQUE DE ALMACENAMIENTO			
Nombre del equipo	Tanque		
Tipo	Almacenamiento		
Identificación	T-102		
Datos técnicos y de operación			
Flujo	Residuos plásticos		
Temperatura de operación	25	°C	
Presión de operación	1	bar	
Temperatura de diseño	30	°C	
Presión de diseño	1	bar	
Capacidad	10	L	
Diámetro	45	cm	
Alto	49.5	cm	
Material	Polietileno		
Notas			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cumple con las normativas ASME y API para almacenamiento seguro.</li> <li>• Instalación sobre base nivelada y anclajes.</li> <li>• Accesorios incluidos: Tapa hermética, asas reforzadas.</li> </ul>			

*Nota.* Esta tabla muestra las especificaciones de diseño y operación del tanque de almacenamiento T102.

**Tabla 29***Especificaciones del tanque de almacenamiento T103*

TABLA DE ESPECIFICACIONES TANQUE DE ALMACENAMIENTO			
Nombre del equipo	Tanque		
Tipo	Almacenamiento		
Identificación	T-103		
Datos técnicos y de operación			
Flujo	Plásticos, nitrógeno		
Temperatura de operación	38	°C	
Presión de operación	2	bar	
Temperatura de diseño	50	°C	
Presión de diseño	5	bar	
Capacidad	20	L	
Diámetro	40	cm	
Alto	60	cm	
Material	Acero inoxidable		
Notas			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fabricado en acero inoxidable certificado AISI 304L o 316L, según las necesidades del producto, en superficies y componentes en contacto con el producto.</li> <li>• Aislamientos en cilindro, techo y fondo, con revestimientos en acero inoxidable AISI 304.</li> <li>• Diseños Verticales y Horizontales</li> <li>• Opción de colocación de camisa para refrigeración o calefacción, hechas a la medida, fabricadas en acero inoxidable AISI304.</li> <li>• División en zonas ATEX.</li> </ul>			

*Nota.* Esta tabla muestra las especificaciones de diseño y operación del tanque de almacenamiento T103.

**Tabla 30***Especificaciones del tanque de almacenamiento T104*

TABLA DE ESPECIFICACIONES TANQUE DE ALMACENAMIENTO			
Nombre del equipo	Tanque		
Tipo	Almacenamiento		
Identificación	T-104		
Datos técnicos y de operación			
Flujo	Residuos plásticos		
Temperatura de operación	120	°C	
Presión de operación	1.8	bar	
Temperatura de diseño	350	°C	
Presión de diseño	5	bar	
Capacidad	150	L	
Diámetro	100	cm	
Alto	250	cm	
Material	Acero inoxidable		
Notas			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cumplen con el Estándar API 12B</li> <li>• Tornillos de alta fuerza de tensión -120,000 lbs por pulgada</li> <li>• Empaques de fila sencilla de agujeros para un sellado impecable</li> <li>• Equipo encapsulado para interiores</li> </ul>			

*Nota.* Esta tabla muestra las especificaciones de diseño y operación del tanque de almacenamiento T104.

**Tabla 31***Especificaciones intercambiador de calor HE101*

TABLA DE ESPECIFICACIONES INTERCAMBIADOR DE CALOR					
Nombre del equipo			Intercambiador de calor		
Tipo: Tubos y carcaza			Identificación		HE-101
Datos técnicos y de operación					
Fluido	N <sub>2</sub> , gases de pirólisis				
Flujo	4.1	kg/h	Área de transferencia de calor	40.268 cm <sup>2</sup>	
Temperatura de entrada	500	°C			
Temperatura de salida	100	°C	U	850 W/m <sup>2</sup> C	
Presión de operación	2	bar	Material tubos	Acero al carbono	
Temperatura de diseño	550	°C	Material carcaza	Acero al carbono	
Presión de diseño	3	bar	Tipo de tubos	Plain	
Orientación	Horizontal				
Tipo	Cilíndrico				
Sistema de enfriamiento					
Servicio industrial	Agua de enfriamiento		Temperatura de entrada	25	°C
Flujo	20	kg/h	Temperatura de salida	96.3	°C
Notas					
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se deben utilizar dos (2) filas de varillas de impacto en un diseño de 30 grados para protección contra impactos.</li> <li>• Los deflectores tendrán una muesca en V de 1" en la parte inferior</li> <li>• La boquilla de entrada de la cáscara debe ubicarse en el lateral</li> <li>• Los tubos falsos (6) se instalarán en el carril divisorio de paso horizontal</li> </ul>					

*Nota.* Esta tabla muestra las especificaciones de diseño y operación del intercambiador de calor HE101.

**Tabla 32***Especificaciones del separador flash FS101*

TABLA DE ESPECIFICACIONES SEPARADOR FLASH	
Nombre del equipo	SEPARADOR FLASH
Tipo	Vertical
Identificación	FS-101
Datos de operación	
Fluido	Gases de pirólisis
Flujo entrada	7.273 kg/h
Flujo gas	4.862 kg/h
Flujo líquido	2.412 kg/h
Temperatura de operación	120 °C
Presión de operación	1.8 bar
%Inundación	53%
Datos técnicos	
Temperatura de diseño	150°C
Presión de diseño	3 bar
Especificaciones de la columna	
Altura	1.676 m
Número de etapas	1
Margen del distribuidor	0.61 m
Diámetro	0.3048 m
Espesor	0.00922 m
Material	Acero al carbono
Notas	

- Equipado con componentes internos como deflector de entrada, paquete de paletas, coalescedor, rompeolas, placas de vertedero y extractor de neblina.
- Diseñado con un margen de corrosión de 1/8 pulgadas para una vida útil prolongada del recipiente
- Cumple con la especificación API 12J, ASME VIII, Div. 1 o 2, NACE MR 0175

*Nota.* Esta tabla muestra las especificaciones de diseño y operación del separador flash FS101.

**Tabla 33**

*Especificaciones soplador B101*

TABLA DE ESPECIFICACIONES SOPLADOR	
Nombre del equipo	Soplador
Identificación	B101
Datos operativos	
Fluido	Nitrógeno
Presión de entrada	1.8 bar
Presión de salida	2 bar
Temperatura	38.02 °C
Caudal	0.8238 ft <sup>3</sup> /min
Potencia	0.013407 hp
Datos técnicos	
Presión de diseño	5 bar
Temperatura de diseño	100 °C
Relación de compresión	0.32
RPM	0.75
Diámetro	8 in
Capacidad	695 cfm
Potencia del motor	1/4 hp
Notas	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presión barométrica media: 998,8 mbar en la succión del filtro del aire, altura sobre el nivel del mar 10 metros</li> <li>• Este soplador viene con un paquete de transmisión que incluye el motor, poleas, correas y bujes.</li> <li>• Normas Certificación CSA; homologación UL</li> <li>• Incluye cubierta de unidad resistente a la intemperie</li> </ul>	

*Nota.* Esta tabla muestra las especificaciones de diseño y operación del soplador B101.

**Tabla 34**

*Especificaciones del soplador B102*

TABLA DE ESPECIFICACIONES SOPLADOR	
Nombre del equipo	Soplador
Identificación	B102
Datos operativos	
Fluido	Gases de pirólisis
Presión de entrada	1.1 bar
Presión de salida	2.027 bar
Temperatura	120 °C
Caudal	0.8855 ft <sup>3</sup> /min
Potencia	0.05546 hp
Datos técnicos	
Presión de diseño	5 bar
Temperatura de diseño	150 °C
Relación de compresión	0.32
RPM	0.75
Diámetro	8 in
Capacidad	695 cfm

Potencia del motor	1/4 hp
Notas	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presión barométrica media: 998,8 mbar en la succión del filtro del aire, altura sobre el nivel del mar 10 metros</li> <li>• Este soplador viene con un paquete de transmisión que incluye el motor, poleas, correas y bujes.</li> <li>• Normas Certificación CSA; homologación UL</li> <li>• Incluye cubierta de unidad resistente a la intemperie</li> </ul>	

*Nota.* Esta tabla muestra las especificaciones de diseño y operación del soplador B102.

**Tabla 35**

*Especificaciones de la cinta de transporte CB101*

TABLA DE ESPECIFICACIONES CINTA DE TRANSPORTE	
Nombre del equipo	Cinta de transporte
Identificación	CB101
Capacidad de carga	1000 kg/h
Longitud de la cinta	1.6 m
Ancho de la cinta	0.8 m
Velocidad de operación	0.2 m/s
Tipo de motor	Motor eléctrico trifásico de 5 HP
Fuente de energía	0.1246 kWh
Material de la cinta	Caucho
Inclinación máxima	30 grados
Accesorios incluidos	Rodillos, soportes ajustables, y sistema de limpieza
Peso total	30 kg
Normativas cumplidas	ISO 9001, CE
Garantía	2 años contra defectos de fabricación

*Nota.* Esta tabla muestra las especificaciones de diseño y operación la cinta de transporte CB101.

**Tabla 36**

*Especificaciones del triturador G101*

TABLA DE ESPECIFICACIONES TRITURADOR	
Nombre del equipo	Triturador de cuchillas
Identificación	G101
Capacidad	150 kg
Dimensiones	24.8 in prof. x 20.5 in an. x 37.4 in al.
Tipo de motor	Motor de cobre puro de 2,2 KW
Sistema de corte	Cuchillas de acero inoxidable ajustables
Tamaño de malla	0.236 in
Velocidad de operación	300 RPM
Ruido operacional	<85 dB
Material del cuerpo	Acero al carbono con recubrimiento anticorrosivo
Sistema de seguridad	Interruptor de emergencia y protección contra sobrecarga
Mantenimiento recomendado	Inspección mensual y afilado de cuchillas cada 6 meses
Normativas cumplidas	ISO 9001, CE
Garantía	1 año contra defectos de fabricación

*Nota.* Esta tabla muestra las especificaciones de diseño y operación la cinta del triturador G101.

**Tabla 37***Especificaciones del cilindro de nitrógeno C101*

<b>TABLA DE ESPECIFICACIONES CILINDRO</b>	
Nombre del equipo	Cilindro de nitrógeno
Identificación	C101
Capacidad	10 m <sup>3</sup>
Presión de trabajo	150 bar (2175 psi)
Material del cilindro	Acero al carbono con recubrimiento anticorrosivo
Dimensiones (altura x diámetro)	2.0 m x 0.8 m
Peso total	200 kg
Conexiones	Válvula de salida tipo CGA-580
Temperatura de operación	-20 °C
Normativas cumplidas	DOT, ISO 9809, CE
Sistema de seguridad	Válvula de alivio de presión y manómetro
Mantenimiento recomendado	Inspección visual mensual y prueba de presión anual
Garantía	5 años contra defectos de fabricación

*Nota.* Esta tabla muestra las especificaciones de diseño y operación la cinta del cilindro de nitrógeno C101.

**Tabla 38***Especificaciones del filtro F101*

<b>TABLA DE ESPECIFICACIONES FILTRO</b>	
Nombre del equipo	Filtro de remoción de sólidos
Identificación	F101
Capacidad de filtración	50 m <sup>3</sup> /h
Tipo de filtro	Filtro de cartucho o filtro de mangas
Material del filtro	Acero inoxidable con recubrimiento anticorrosivo y resistencia a altas temperaturas
Dimensiones (L x An x Al)	0.8 m x 0.6 m x 1.2 m
Presión de operación	2 bar
Temperatura de operación	490 °C a 600 °C
Tamaño máximo de partículas	5 micrones
Sistema de limpieza	Limpieza automática por pulso de aire
Conexiones	Entradas y salidas con bridas estándar DN50
Sistema de seguridad	Válvula de alivio y manómetro para monitoreo
Mantenimiento recomendado	Inspección mensual y cambio de cartuchos cada 3 meses
Normativas cumplidas	ISO 9001, CE
Garantía	2 años contra defectos de fabricación

*Nota.* Esta tabla muestra las especificaciones de diseño y operación del filtro F101.

## Apéndice F. Análisis DOFA

**Figura 12**

*Análisis DOFA de las limitaciones y restricciones del proceso*



*Nota.* Esta tabla figura muestra la matriz DOFA de las limitaciones y restricciones establecidas para el proceso.