

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)

José Javier Arciniegas Hernández y Juan Sebastián Camacho Flórez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Yesid Javier Rueda Ordóñez

PhD. Ingeniería Química

Codirector

Diego Andrés Rueda Ordóñez

PhD. en Ciencias

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2024

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	9
1. Objetivos .....	11
1.1 Objetivo General .....	11
1.2 Objetivos Específicos.....	11
2. Descripción del modelo .....	12
3. Primera Etapa (Alimentación) .....	17
3.1 Simulación del sistema de alimentación .....	17
3.2 Diseño del sistema de alimentación.....	17
3.2.1 Tolva .....	17
3.2.2 Tornillo sin fin .....	17
4. Segunda Etapa (Pirólisis).....	18
4.1 Simulación del sistema de pirólisis.....	18
4.1.1 Reactor .....	18
4.1.2 Cámara de combustión.....	18
4.2 Diseño del sistema de pirólisis.....	19
4.2.1 Reactor .....	19
4.2.2 Cámara de combustión.....	19
4.2.3 Selección de equipos para el sistema .....	20
5. Tercera Etapa (Enfriamiento) .....	20
5.1 Simulación del proceso de enfriamiento.....	20
5.1.1 Condensador de los gases de pirolisis y gases de combustión.....	20

5.1.2 Torre de enfriamiento y equipos para el sistema .....	20
5.2 Diseño del proceso de enfriamiento.....	21
5.2.1 Condensador de los gases de pirólisis y gases de combustión.....	21
5.2.2 Torre de enfriamiento .....	21
5.2.3 Selección de equipos para el sistema .....	21
6. Cuarta Etapa (Extracción).....	22
6.1 Simulación del proceso de extracción.....	22
6.1.1 Tornillo sin fin-tolva y separador .....	22
6.2 Diseño del proceso de extracción .....	22
6.2.1 Tornillo sin fin-tolva y separador .....	22
7. Resultados de la simulación.....	23
7.1 Efecto de la temperatura en la formación de productos.....	23
7.2 Características del aceite líquido producido .....	25
7.3 Composición química del gas y aceite pirolítico .....	28
8. Resultados del diseño de la planta .....	30
8.1 Características globales de la planta piloto .....	30
8.2 Comparación planta diseñada vs plantas comerciales .....	33
9. Conclusiones .....	39
10. Recomendaciones .....	40
Referencias Bibliográficas .....	41

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Modelo usado para cada operación unitaria en aspen plus.....	13
Tabla 2. Caracterización promedio de la corriente HDPE según distintos autores .....	14
Tabla 3. Distribución del tamaño de partícula en mm para la corriente HDPE.....	15
Tabla 4. Caracterización del gas natural según Vanti s.a. esp. ....	15
Tabla 5. Caracterización de la gasolina, diésel y del aceite de HDPE a 500 °C.....	27
Tabla 6. Porcentajes masicos de cada compuesto presente en el gas pirolítico a 500 °C.....	28
Tabla 7. Porcentajes masicos de los principales compuestos en el aceite pirolítico a 500 °C.....	29
Tabla 8. Características principales de la planta piloto desarrollada.....	32
Tabla 9. Comparación de prestaciones plantas comerciales.....	34

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Diagrama de flujo del proceso simulado en aspen plus .....	12
Figura 2. Diagrama de flujo de los sistemas diseñados en la planta piloto .....	16
Figura 3. Porcentajes masicos de gases, líquidos, aromáticos de diferentes autores.....	23
Figura 4. Clasificación, distribución y productos del aceite pirolítico obtenido a 500 °C .....	25
Figura 5. Modelo CAD de la planta piloto de pirólisis desarrollada .....	31
Figura 6. Ficha técnica del sistema de alimentación.....	35
Figura 7. Ficha técnica del sistema de pirólisis .....	36
Figura 8. Ficha técnica del sistema de descarga .....	37
Figura 9. Ficha técnica del sistema de enfriamiento.....	38

### Lista de Apéndices

Apéndice A. Entradas principales de la simulación

Apéndice B. Cálculo de la cinética

Apéndice C. Cálculos tolva alimentación

Apéndice D. Cálculos tornillo sin fin alimentación

Apéndice E. Selección rodamiento entrada tornillo al reactor

Apéndice F. Selección rodamiento soporte del reactor

Apéndice G. Selección chumacera soporte del reactor

Apéndice H. Selección válvula mariposa

Apéndice I. Cálculo corona-piñón/selección motor

Apéndice J. Cálculos sistema de pirolisis

Apéndice K. Selección quemador y sistema de control

Apéndice L. Cálculos tornillo sin fin desechos

Apéndice M. Cálculos tolva desechos

Apéndice N. Selección torre de enfriamiento y tanque

Apéndice O. Selección separador flash

Apéndice P. Selección ventiladores y tuberías

Apéndice Q. Selección bombas y tuberías

Apéndice R. Condensadores simulación

Apéndice S. Planos CAD

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS

## Resumen

**Título:** 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)\*

**Autor:** José Javier Arciniegas Hernández y Juan Sebastián Camacho Flórez\*\*

**Palabras Clave:** Pirólisis, Producto de combustible, Recuperación de energía, Cinética, Diseño de planta

**Descripción:** Los principales desafíos globales, como la gestión de residuos plásticos debido a su naturaleza no biodegradable y el agotamiento progresivo de los combustibles fósiles debido a su demanda constantemente creciente, están impulsando la evolución de tecnologías como la pirólisis. Este artículo presenta el diseño, la simulación en Aspen Plus y el modelado en SolidWorks de una planta de pirólisis de polietileno de alta densidad, con una capacidad de alimentación de 100 kg/h, empleando un reactor rotativo continuo a una temperatura de 500°C y un tiempo de residencia de 8.33 minutos. Este modelo permite predecir la formación de 40 compuestos como productos, con rendimientos de aceite, gas, ceniza y carbón de 72.24, 15, 12.7 kg/h, respectivamente. El modelo fue validado comparando las predicciones con datos experimentales de S. Kumar. (2013), R. K. Singh. (2011) y P. Lettieri. (2010), evaluando las fracciones de masa de los productos de gas, líquido, ceniza y carbón a temperaturas que van de 400 a 600 °C. Las propiedades del aceite producido se compararon con las de los combustibles convencionales, revelando una notable similitud en sus características, lo que posiciona al aceite de pirólisis como una alternativa viable y prometedora en el campo de los biocombustibles.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Ingeniería Mecánica. Director: Yesid Javier Rueda Ordóñez. PhD. Ingeniería Química. Codirector: Diego Andrés Rueda Ordóñez. PhD. en Ciencias.

### Abstract

**Title:** Design of a Pilot Pyrolysis Plant Aimed at the Selective Extraction of Chemical Compounds with High Relevance and Added Value from High-Density Polyethylene (HDPE)\*

**Author(s):** José Javier Arciniegas Hernández y Juan Sebastián Camacho Flórez\*\*

**Key Words:** Pyrolysis, Fuel product, Energy recovery, Kinetics, Plant design

**Description:** The main global challenges, such as plastic waste management due to its non-biodegradable nature and the progressive depletion of fossil fuels because of their constantly increasing demand, are driving the evolution of technologies like pyrolysis. This article presents the design, simulation in Aspen Plus, and modeling in SolidWorks of a high-density polyethylene pyrolysis plant, with a feed capacity of 100 kg/h, employing a continuous rotary reactor at a temperature of 500°C and a residence time of 8.33 minutes. This model enables the prediction of the formation of 40 compounds as products, with yields of oil, gas, ash, and charcoal of 72.24, 15, 12.7 kg/h, respectively. The model was validated by comparing predictions with experimental data from S. Kumar. (2013), R. K. Singh. (2011), and P. Lettieri. (2010), evaluating the mass fractions of gas, liquid, ash, and charcoal products at temperatures ranging from 400 to 600 °C. The properties of the produced oil were compared with those of conventional fuels, revealing a notable similarity in their characteristics, positioning pyrolysis oil as a viable and promising alternative in the field of biofuels.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Fisicomecánicas. School of Mechanical Engineering. Mechanical Engineering. Director: Yesid Javier Rueda Ordóñez. PhD. Chemical Engineering. Codirector: Diego Andrés Rueda Ordóñez. PhD in Science.

## Introducción

En el panorama global, se enfrentan desafíos de considerable magnitud que demandan soluciones innovadoras y sostenibles. Entre estos, se destacan la gestión de residuos plásticos, cuyas estimaciones según la OECD (2022) proyectan alcanzar los 1014 millones de toneladas para el año 2060. De los cuales según la UNDP (2024) el 79% se destina a vertederos, el 12% se incinera y solo el 9% se recicla. Por otro lado, se encuentra el agotamiento de las reservas de combustibles fósiles, como señala la AIE (2009). Según sus predicciones, las reservas de gas natural y petróleo se agotarán en un plazo de 48 y 27 años respectivamente.

En respuesta a estos desafíos, resulta crucial explorar soluciones tecnológicas sustentables. Entre estas, la pirólisis emerge como una opción prometedora frente a los enfoques tradicionales, siendo un proceso termoquímico que descompone la materia en ausencia de oxígeno y la transforma en carbón, combustibles líquidos y gaseosos, contribuyendo no solo a reducir la acumulación de desechos plásticos, sino también a proporcionar una alternativa viable para mitigar la dependencia de los combustibles fósiles.

En este trabajo, se llevó a cabo el diseño y modelado asistido por computadora CAD en Solid Works de una planta piloto de pirólisis, considerando factores operativos específicos para el polietileno de alta densidad (HDPE), el cual figura como el tercer plástico más producido, según la OECD (2022). Además, se realizó la simulación en Aspen Plus para anticipar las composiciones y flujos de salida de los productos, los cuales fueron posteriormente contrastados y validados con la información disponible en la literatura.

Varios estudios de literatura han presentado diferentes condiciones de operación para la pirólisis del polietileno de alta densidad. Como resultado, se han observado diversas tendencias y

resultados, por ejemplo, investigadores como Kumar y Singh (2011) utilizaron un sistema de reactor de pirólisis simple para HDPE de desecho con el objetivo de optimizar el rendimiento del producto líquido en un rango de temperatura de 400°C a 550°C. Los resultados de los experimentos mostraron que, a una temperatura de 450°C y por debajo de esta, el producto principal de la pirólisis era un líquido oleoso que se convertía en líquido viscoso o sólido ceroso a temperaturas superiores a 475°C. El rendimiento de la fracción líquida obtenida aumentó con el tiempo de residencia para el HDPE de desecho. Las propiedades físicas del aceite pirolítico obtenido mostraron la presencia de una mezcla de fracciones de combustible como gasolina, queroseno y diésel.

S.M. Al-Salem (2019), llevo a cabo la pirólisis térmica de HDPE con el objetivo de producir aceites de hidrocarburos, en un reactor fijo por lotes. La pirólisis se realizó entre 500 y 800 °C en presencia de nitrógeno como gas portador inerte, produciendo un alto porcentaje de alquitranes, incluyendo 70% aceite de pirólisis a 550 °C y 36% de fracciones de gas a 750 °C. El análisis de cromatografía mostró la evolución de hidrocarburos líquidos de rango de gasolina en proporciones elevadas. El trabajo también demostró que más del 96% del aceite obtenido era del rango en hidrocarburos de C13 y superiores. En el análisis del producto de aceite, la producción de hidrocarburos aromáticos fue mucho menor en comparación con los hidrocarburos alifáticos. Entre los hidrocarburos gaseosos, se obtuvieron como productos principales más del >70% en los de rango C2 a C4.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Diseñar en detalle 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).

### **1.2 Objetivos Específicos**

Diseñar la planta piloto con los siguientes parámetros: capacidad de alimentación de 100 kg/h de PEAD a un tamaño de partícula de 0.002 m. Reactor de lecho móvil, inclinado y continuo a temperatura entre 300 y 600°C. Combustible gaseoso, con fracción de gases pirolíticos como fuente de energía al reactor. Temperatura de operación del condensador entre 40 y 150°C, enfriado por agua, orientada a la extracción selectiva de compuestos químicos.

Predecir las fracciones y composiciones de los productos químicos generados en la planta piloto, a partir de las condiciones de operación, la cinética de las reacciones, la composición de la alimentación, mediante la simulación del proceso químico en el software Aspen Plus.

Determinar las condiciones óptimas de selectividad en los productos de la planta piloto por medio de un análisis paramétrico entre temperatura, presión, volumen, sobre la composición y fracción de los productos químicos.



**Tabla 1***Modelo usado para cada operación unitaria en aspen plus*

<b>Bloque</b>	<b>Tipo</b>	<b>Función</b>
DECOMP	R-Yield	Reactor de transición a moléculas elementales, modelo de reacción de rendimiento para la descomposición a componentes elementales, isotérmico (500°C, HDPE), isobárico (1 atm)
REACTOR	R-Plug	Reactor de pirólisis, modelo de reacción cinético, isotérmico (500 °C, RX-1), isobárico (1 atm).
CICLÓN	Cyclone	Divisor de corrientes, filtro de recuperación de los sólidos en la corriente de gases pirolíticos (RX-2)
TORNILLO	Heater	Enfriador de los productos solidos (CEN-CAR1) por perdidas del tornillo sin fin
FAN-1	Pump	Ventilador impulsor de la corriente de gases pirolíticos (PYGAS-1)
CONDEN-1	Heat X	Condensador de los gases pirolíticos (PYGAS-2) hasta 50 °C (PYOIL)
SEP	Flash	Separador flash, isotérmico (50 °C, PYOIL y GAS-1), isobárico (1 atm).
DIV	FSplit	Divisor de corrientes para la alimentación de la cámara (GAS-1)
CÁMARA	R-Stoic	Reactor de combustión, modelo de reacción estequiométrica, isobárico (1 atm, COMB-1).
FAN-2	Pump	Ventilador impulsor de la corriente de gases de combustión (COMB-2)
CONDEN-2	Heat X	Enfriador de los gases de combustión (COMB-3) hasta 150 °C (COMB-4)
TORRE	Heater	Torre de enfriamiento del agua de alimentación a los condensadores (AGUA-4) hasta 29°C (AGUA-1)
BOMBA	Pump	Bomba impulsora del agua (AGUA-1)

Se desarrollo bajo el método globale PENG ROB (Peng-Robins equation of state), declarando más de 50 compuestos diferentes y suponiendo que el carbón solo contiene carbono y cenizas, una condición de estado estacionario, la homogeneidad de tamaño en las partículas y la uniformidad de temperaturas en cada bloque. Se declararon en la planta cuatro corrientes de entrada con una clase MIXCIPSD usada cuando hay presentes componentes convencionales y no convencionales (significa que no está disponible en la base de datos de Aspen Plus™) para el

desarrollo del proceso, todos los componentes declarados en la simulación se encuentran en el Apéndice A.

La corriente HDPE a 25 °C de temperatura, 1 atm de presión y 100 Kg/hr de flujo como materia prima para el proceso. Al ser un componente no convencional se caracterizó con el modelo de entalpía HCOALGEN, basado en las correlaciones de Boie para el calor de combustión, en la correlación Heat-Of-Combustion-Based para el estándar del calor de formación, en Kirov para la capacidad calorífica y en el estado estándar de los elementos para la base de entalpía. El modelo de densidad DCOALIGT, basado en las correlaciones IGT de acuerdo al promedio normalizado del análisis próximo, análisis último, de azufre y el poder calorífico superior de distintos autores, además de la distribución de tamaño de partícula. Todo esto para poder descomponer la corriente en elementos convencionales C, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, S, etc. por medio del bloque DECOMP antes de ser alimentado al bloque REACTOR. En la Tabla 2 se detalla la caracterización específica que se utilizó para el HDPE y su distribución del tamaño de partícula se exhibe en la Tabla 3.

**Tabla 2**

*Caracterización promedio de la corriente HDPE según distintos autores*

Muestra	Análisis próximo (Wt%)				Análisis último (Wt%)					HHV (MJ/Kg)
	Moisture	CF	MV	Ash	C	H	N	O	S	
HDPE <sup>A</sup>	-	-	-	-	86.09	12.99	0.00	0.00	0.28	-
HDPE <sup>B</sup>	0.00	0.00	100.00	0.00	86.10	13.00	0.00	0.90	0.00	46.40
HDPE <sup>C</sup>	-	-	-	-	83.90	14.90	0.50	0.74	0.00	49.42
HDPE <sup>D</sup>	0.10	11.9	77.70	10.4	83.33	13.28	0.30	0.51	0.00	44.81
HDPE <sup>E</sup>	0.01	0.00	96.87	3.12	82.65	13.31	0.00	0.36	0.56	44.49
HDPE <sub>PROM</sub>	0.04	3.97	91.52	4.51	84.41	13.50	0.16	0.50	0.17	46.28
HDPE <sub>NORM</sub>	0.04	4.00	91.46	4.50	81.78	13.07	0.16	0.49	0.00	46.28

**Tabla 3***Distribución del tamaño de partícula en mm para la corriente HDPE*

<b>Intervalo</b>	<b>Límite inferior</b>	<b>Límite superior</b>	<b>Fracción por intervalo</b>	<b>Fracción acumulativa</b>
1	1.9	2.2	0.1	0.1
2	2.2	2.5	0.9	1

La corriente de GASNAT a 25 °C de temperatura, 1 atm de presión y 4.46 Kg/hr de flujo como combustible para el bloque CAMARA durante 22 minutos hasta que se abastezca solo a partir de los gases pirolíticos recirculados, fue caracterizado por la información de la empresa distribuidora de gas natural en Bucaramanga, Colombia, Vanti. Dichas proporciones, se presentan en la Tabla 4 a continuación.

**Tabla 4***Caracterización del gas natural según Vanti s.a. esp.*

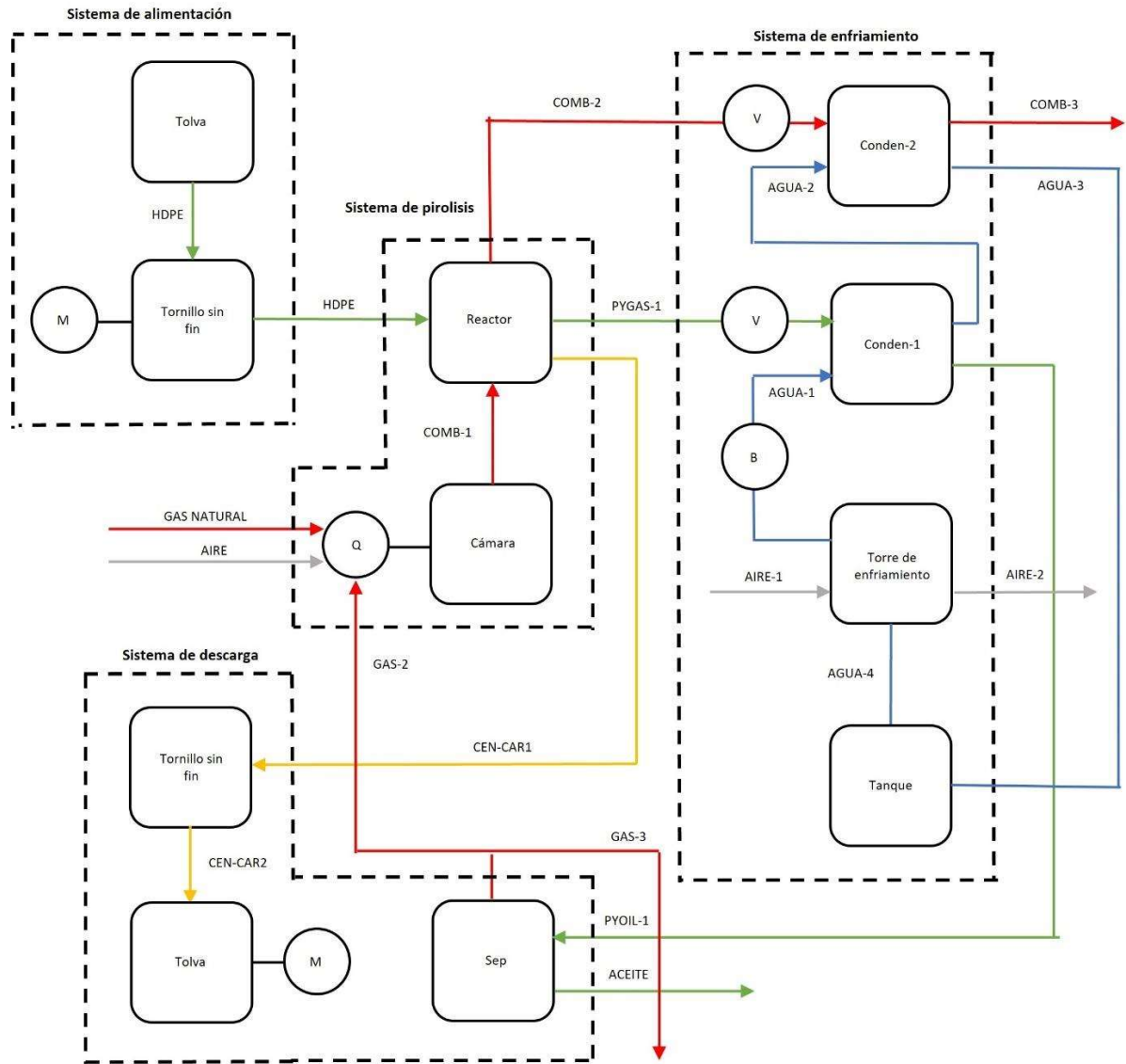
<b>Elemento</b>	<b>v (%)</b>	<b>Elemento</b>	<b>v (%)</b>	<b>Elemento</b>	<b>v (%)</b>	<b>Elemento</b>	<b>v (%)</b>
Metano	81.86	Propano	1.92	Buteno	0.22	Nitrógeno	3.18
Etano	11.61	Butano	0.23	Dióxido de carbono	0.90		

La corriente AIRE a 25 °C de temperatura, 1 atm de presión y 86.62 Kg/hr de flujo con gas natural y 90.6 Kg/hr con gases de recirculación, con humedad relativa de 75% extraída del IDEAM presente en Bucaramanga, Colombia, como oxidante en el bloque CAMARA. Por último, la corriente AGUA-1 a 29 °C de temperatura, 1 atm de presión y 7500 Kg/hr de flujo como líquido refrigerante en los bloques CONDEN-1 y CONDEN-2 y siendo enfriada por el bloque TORRE.

El diseño y la simulación de los equipos de la planta piloto de pirolisis, se dividió en cuatro etapas, donde la metodología de cada una se describe en los siguientes cuatro incisos. Los equipos correspondientes a cada etapa se presentan en la Figura 2.

**Figura 2**

*Diagrama de flujo de los sistemas diseñados en la planta piloto*



### **3. Primera Etapa (Alimentación)**

#### **3.1 Simulación del sistema de alimentación**

En la simulación, es importante destacar que la tolva y el tornillo sin fin no pueden ser directamente simulados. Sin embargo, se abordó esta limitación al asignar al HDPE las propiedades de salida del tornillo sin fin. En consecuencia, se conservan los parámetros velocidad, tamaño y temperatura de la línea.

#### **3.2 Diseño del sistema de alimentación**

##### ***3.2.1 Tolva***

El diseño de la tolva de alimentación se fundamentó en el análisis estático, Se determinó que el operario encargado de la planta llevará a cabo las tareas de alimentación y descarga de materias primas y productos a intervalos regulares de 150 minutos, teniendo en cuenta que el proceso operativo tiene una duración aproximada de 15 minutos. Este enfoque garantizó un suministro ininterrumpido del material necesario para el funcionamiento de la planta. La metodología usada para el cálculo de los espesores de la tolva fue mediante la presión hidrostática que ejerce el material en las paredes y para el cálculo de los soportes se usó teoría de columnas largas. Los cálculos en detalle se presentan en el Apéndice C.

##### ***3.2.2 Tornillo sin fin***

El diseño del tornillo sin fin fue basado por los parámetros establecidos en la norma CEMA (2009) y el catálogo de KSW Design Engineering Manufacturing (2016), los cuales prescriben los estándares de diseño pertinentes para los tornillos transportadores. La selección se fundamentó en criterios específicos del HDEP, como el flujo másico de 100 kg/h, tamaño de partícula de 0.002 m

y una densidad de  $0.96 \text{ ton/m}^3$ . En el Apéndice D, se presentan los cálculos y el procedimiento del tornillo sin fin. Los cálculos en detalle se presentan en el Apéndice D.

## **4. Segunda Etapa (Pirólisis)**

### **4.1 Simulación del sistema de pirólisis**

#### **4.1.1 Reactor**

El bloque DECOMP configurado como un reactor de rendimiento, donde el HDPE se descompone en sus constituyentes básicos:  $C, H_2, O_2, N, H_2O, Ash$ . El bloque REACTOR configurado como un reactor de flujo pistón se desarrolló con el modelo cinético para el HDPE derivado de las ecuaciones propuestas por Olazar (2008), utilizando los datos experimentales de rendimiento, constantes de velocidad cinética, energías de activación y factores pre exponenciales de productos primarios, según las investigaciones de Lettieri (2010). Estos parámetros permitieron la estimación de las ecuaciones cinéticas para los productos en función de la masa del plástico, ajustándolos con relación al hidrógeno  $X_{H_2}$ . Finalmente, se derivaron las expresiones de velocidad específicas para cada producto. A partir de los datos experimentales de Williams (2013), Kumar (2023), Singh (2023). Por último, el bloque CIICLON configurado como un separador gas-sólido replicó el proceso de separación entre los gases y el carbón y cenizas producto en el reactor. Los cálculos en detalle se presentan en el Apéndice A y Apéndice B.

#### **4.1.2 Cámara de combustión**

El bloque CAMARA se concibe como un reactor estequiométrico basado en las reacciones de combustión completa con 20% de exceso de aire para cada el gas natural y de los gases no

condensables un 48 % considerando una fracción de conversión total para cada combustible. Los cálculos en detalle se presentan en el Apéndice A.

## **4.2 Diseño del sistema de pirólisis**

### **4.2.1 Reactor**

La longitud se calculó mediante la ecuación de Friedman y Marshall (1949) con parámetros ajustados por Arruda (2007). El espesor se seleccionó considerando el diámetro interior del rodamiento que sella la cámara de combustión, la temperatura máxima y se realizó el análisis de esfuerzos estático a partir del modelo de Von Mises para asegurar su correcto funcionamiento con las cargas soportadas. La potencia consumida se calculó desarrollando el balance de energía y la potencia se determinó mediante la aplicación de la ecuación desarrollada por Nonhebel (2018). Por último, el número de dientes de la corona y el piñón se calculó mediante la ecuación de Z con respecto a N. Los cálculos en detalle se presentan en el Apéndice J y el Apéndice I.

### **4.2.2 Cámara de combustión**

El espesor de la lámina donde se monta el cemento refractario se calculó para operación a 1000 °C y el de la lámina exterior del equipo para operación a 70 °C por la norma ISO 13732-1, en acero inoxidable 310S. Se desarrollo un análisis por resistencias térmicas para determinar los espesores del refractario WhiteCAC80-Tabularalumina, y el aislante E-GLASS, garantizando que el espesor del refractario disminuya la temperatura de los gases de combustión a la temperatura permitida de lámina de montaje y el espesor del aislante disminuya a la temperatura permitida en la lámina exterior. Por último, se desarrolló el balance de energía para determinar la potencia total y calcular la masa necesaria de combustible en la primera etapa con gas natural y en la segunda etapa con gases de recirculación. Los cálculos en detalle se presentan en el Apéndice J.

#### ***4.2.3 Selección de equipos para el sistema***

Se procedió a seleccionar los rodamientos ubicados entre el tornillo sin fin al reactor, así como entre el reactor a la cámara de combustión, y entre el reactor a la cámara de separación, basándose en sus diámetros respectivos utilizando el catálogo de SKF Colombia. El cálculo del rodillo el cual soporta el reactor esta dado por las ecuaciones de diámetro mínimo por fatiga. Las chumaceras fueron seleccionadas mediante análisis estático y de resistencia, utilizando el catálogo de SKF Colombia. Los elevadores seleccionados fueron propuestos por Fernández (2019) y el quemador se seleccionó del catálogo BNTET-Boiler. Por último, el motor se seleccionó a partir del catálogo Exhibir, en cumplimiento con los requisitos de potencia establecidos. Los cálculos en detalle se presentan en el Apéndice E, Apéndice F, Apéndice G y Apéndice K.

### **5. Tercera Etapa (Enfriamiento)**

#### **5.1 Simulación del proceso de enfriamiento**

##### ***5.1.1 Condensador de los gases de pirólisis y gases de combustión***

El bloque CONDEN-1 y CONDEN-2 configurados como un Heat-X con una temperatura de salida a 50 °C y 150 °C de la salida respectivamente.

##### ***5.1.2 Torre de enfriamiento y equipos para el sistema***

El bloque TORRE configurado como un Heater con temperatura de salida a 29.44 °C extraído de las especificaciones de la torre de enfriamiento seleccionada. Por último, los bloques FAN-1, FAN-2 Y BOMBA configurados como Pump a los valores específicos de presión y velocidad dada por la selección cada equipo respectivamente.

## **5.2 Diseño del proceso de enfriamiento**

### ***5.2.1 Condensador de los gases de pirólisis y gases de combustión***

Fueron desarrollados como intercambiadores de calor tipo coraza y tubos, diseñados y calculados a través de Aspen Exchanger Design & Rating V10 utilizando la norma ASME Sección VII DIV 1, la clase de refinería R y servicio TEMA. Se ingresaron las propiedades de las corrientes de entrada y los requisitos de salida, tanto los gases de pirólisis como los de combustión respectivamente. El software proporcionó una geometría inicial minimizando costos. Sin embargo, este modelo presentó recomendaciones, advertencias y errores, que fueron abordados de manera iterativa cambiando la configuración. Los cálculos en detalle se presentan en el Apéndice R.

### ***5.2.2 Torre de enfriamiento***

La selección de la torre de enfriamiento se basó en la temperatura del agua al salir del CONDEN-2 y la temperatura de entrada del conden-1, Las cuales deben ser las de salida y entrada de la torre respectivamente. La capacidad de agua requerida se calculó para suplir ese delta de temperatura. Los cálculos realizados para dicha selección se encuentran en el Apéndice N.

### ***5.2.3 Selección de equipos para el sistema***

La selección del tanque de agua se determinó a partir del flujo masico total menos el flujo en los dos condensadores y en la torre de enfriamiento más el flujo evaporado. La selección de la bomba centrífuga se realizó a partir de los requerimientos de flujo masico de agua dado por la torre de enfriamiento seleccionada, ya que las distancias en tuberías, y alturas son mínimas se desprecian las pérdidas y el requerimiento de altura de cabeza de la bomba. Véase el Apéndice Q donde se seleccionó las bombas y la tubería correspondiente. La selección de los ventiladores se determinó a partir de los requerimientos de operación, los cuales se detallan en el Apéndice P y las especificaciones de las tuberías utilizadas para conectar los ventiladores con los equipos se definen

mediante cambios de sección para alcanzar las velocidades requeridas, así como a través de acoples y reducciones necesarias para su implementación. Los cálculos en detalle se presentan en el Apéndice P y el Apéndice Q.

## **6. Cuarta Etapa (Extracción)**

### **6.1 Simulación del proceso de extracción**

#### ***6.1.1 Tornillo sin fin-tolva y separador***

El bloque TORNILLO se configuro como un Heater ingresando la potencia perdida por convección natural validando que la temperatura de salida fuera menor a la temperatura de autoignición. El bloque SEP se configuro como un flash a la temperatura de salida del condensador determinada entre la temperatura de burbuja y de rocío del PYOIL1.

### **6.2 Diseño del proceso de extracción**

#### ***6.2.1 Tornillo sin fin-tolva y separador***

La tolva y el tornillo se desarrollaron aplicando la misma metodología que en el sistema de alimentación. Por último, El separador se seleccionó del catálogo Wessel (2024). Los cálculos en detalle se presentan en el Apéndice H, Apéndice L, Apéndice M y el Apéndice O.

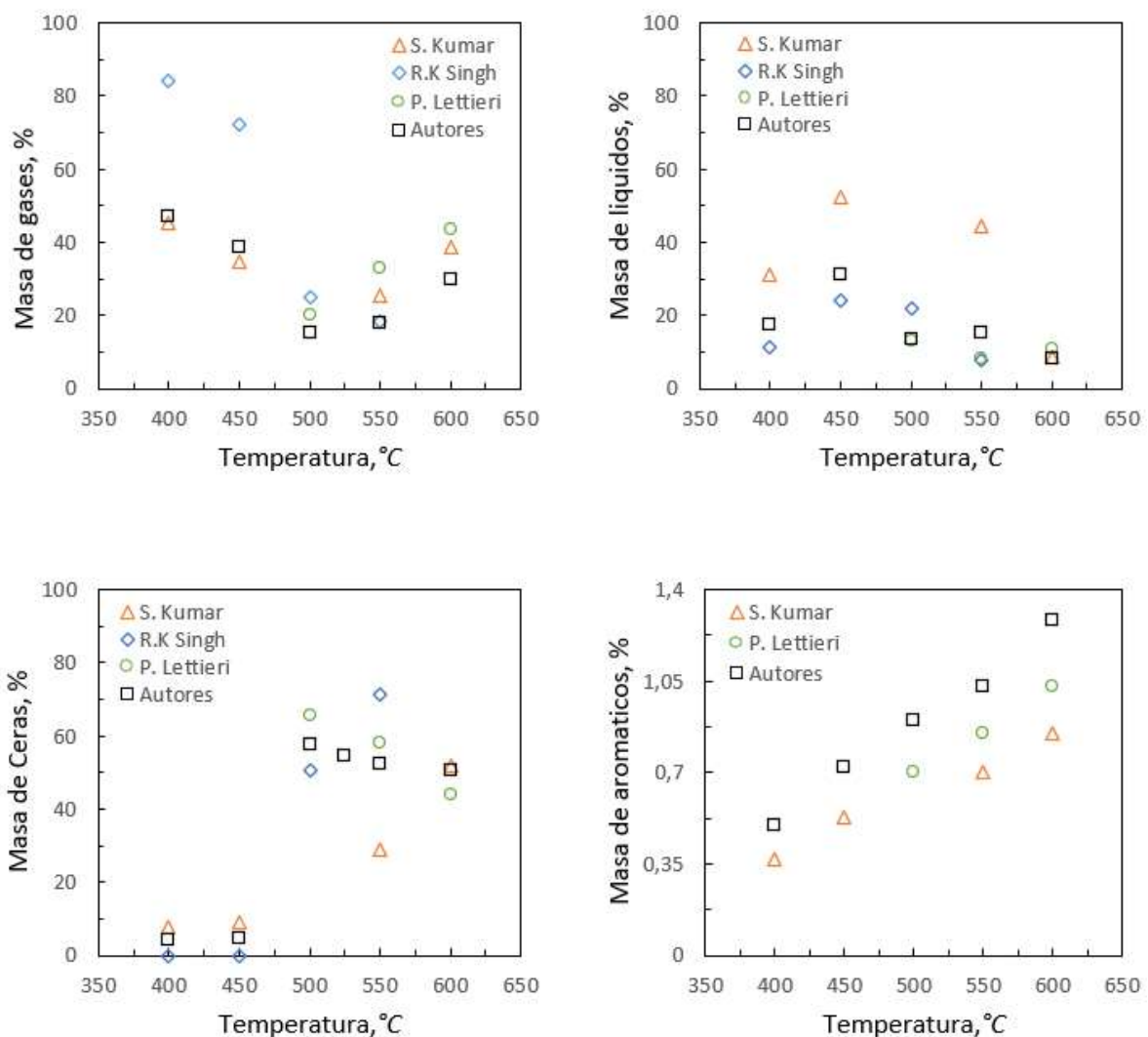
### 7. Resultados de la simulación

#### 7.1 Efecto de la Temperatura en la Formación de Productos

El efecto de la temperatura se analizó ejecutando la simulación a diferentes temperaturas y registrando las cantidades de productos formados (Figura 3). Los resultados de la simulación se validaron con los valores de la literatura proporcionados por S. Kumar, R. K. Singh y P. Lettieri.

**Figura 3**

*Porcentajes masicos de gases, líquidos, aromáticos de diferentes autores*



La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra el porcentaje en masa de los productos pirolíticos obtenidos a diferentes temperaturas: 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C y 600 °C. Los resultados de la simulación concuerdan de manera precisa con los resultados experimentales reportados por S. Kumar, R. K. Singh y P. Lettieri, con un error relativo promedio dentro del rango de  $\pm 0.213\%$  a 400 °C,  $\pm 0.215\%$  a 450 °C,  $\pm 0.206\%$  a 500 °C,  $\pm 0.216\%$  a 550 °C y  $\pm 0.187\%$  a 600 °C.

Estas discrepancias se atribuyen a diferencias en las velocidades de calentamiento, composiciones de alimentación, tipo de reactor, tiempo de residencia y la presencia de catalizadores o gas inerte para crear una atmósfera libre de oxígeno. En general, el modelo de simulación demostró ser adecuado para predecir la distribución de productos en un rango de temperaturas de 400 a 600 °C, siendo a 500°C la mayor producción de aceite pirolítico con cadenas (C6-C25).

Se observaron patrones claros en relación con la temperatura. En cuanto a los gases, una disminución del 47.03% al 15.11% al aumentar la temperatura de 400 °C a 500 °C, seguida de un leve repunte a temperaturas superiores, alcanzando un 18.08% a 550 °C y un 29.83% a 600 °C. Este fenómeno se debe a las reacciones secundarias de craqueo por los hidrocarburos pesados a temperaturas elevadas, descomponiendo estas cadenas de carbono mayores a menores.

En el caso de los líquidos, se encontró un máximo valor del 31.04% a 450 °C, seguido de una disminución gradual hasta el 13.41% a 500 °C. Esto se debe a la polimerización y el aumento de la energía térmica de estas cadenas intermedias produciendo cadenas de hidrocarburos más pesados en el rango de las ceras. A su vez, la proporción de aromáticos aumentó constantemente con la temperatura debido a las reacciones de ciclación y aromatización, aunque su fracción fue mínima en comparación con otros productos debido a la baja tendencia del HDPE a la formación

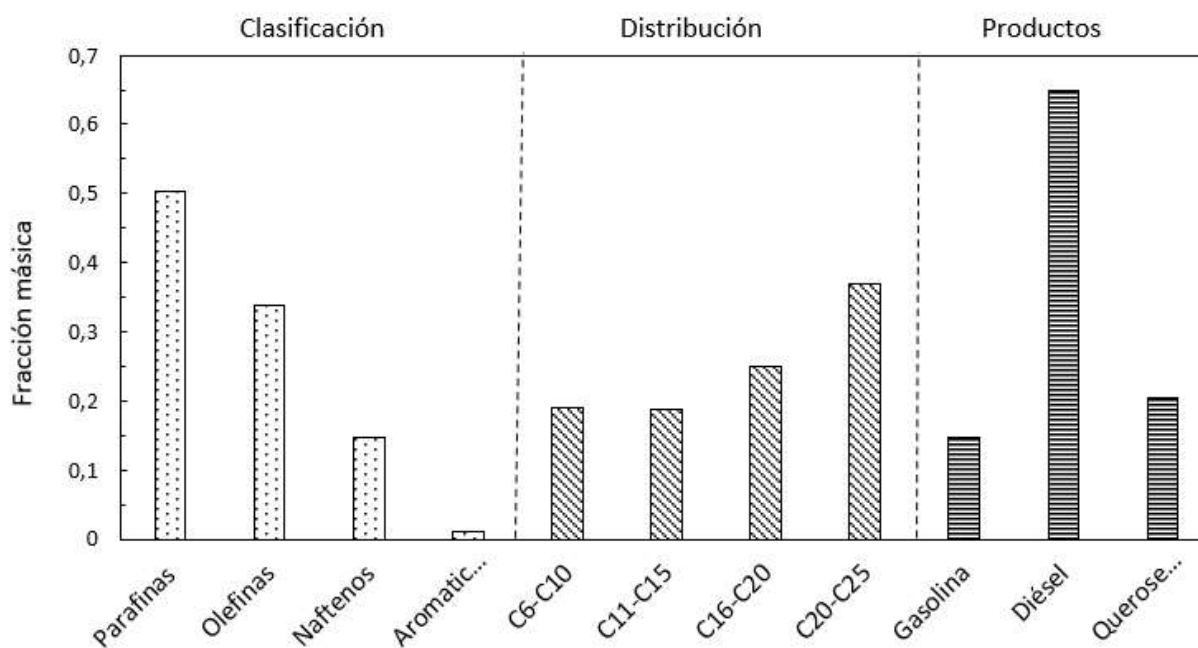
de aromáticos. Respecto a las ceras, se observó un aumento considerable del 4.69% al 57.67% al aumentar la temperatura de 450 °C a 500 °C, ya que el aumento de temperatura favorece exponencialmente la polimerización a ceras hasta los 500 °C donde empiezan a generarse reacciones de craqueo.

## 7.2 Características del aceite líquido producido

Se llevó a cabo la caracterización del aceite pirolítico, producto de la simulación de la planta, con el objetivo de conocer las proporciones de hidrocarburos, su clasificación y su viabilidad para ser destilado en combustibles convencionales. Además, se determinó su idoneidad como combustible mediante la comparación de los parámetros más relevantes del aceite con los de los combustibles convencionales, como se muestra en la Figura 4 y Tabla 5 respectivamente.

### Figura 4

*Clasificación, distribución y productos del aceite pirolítico obtenido a 500 °C*



Los hidrocarburos presentes en el aceite líquido derivado de la planta piloto diseñada se encuentran clasificados de la siguiente manera. Las parafinas, que constituyen el 50.41% de la composición, generan una mayor eficiencia en la combustión, mitigando la formación de residuos en los motores. Por su parte, las olefinas, representando el 33.94% del total, elevan el índice de octanaje. Los naftenos, que comprenden el 14.56% de la mezcla, estabilizan el combustible. Por último, los aromáticos, que representan el 1.05% de la composición, desempeñan inhiben la formación de residuos sólidos durante el proceso de combustión.

El aceite también abarca diversos rangos de carbono, con un 80.89% de hidrocarburos pesados en el rango de C11 a C25. Esta característica proporciona una mayor densidad energética por volumen de combustible, lo que resulta en una eficiencia energética superior. Además, una mayor lubricidad, lo que lo hace adecuado para su aplicación en turbinas y motores, donde la lubricación es crucial para un funcionamiento óptimo. A su vez, mayor estabilidad térmica, lo que permite mantener su integridad química incluso en condiciones de altas temperaturas. Por último, presenta una menor volatilidad, lo que reduce su susceptibilidad a la evaporación o a fugas durante el almacenamiento y transporte, aumentando la seguridad y la confiabilidad en la manipulación y distribución del combustible.

Por último, si se llevara a cabo un proceso de destilación del aceite se extraería 64.96% de diésel, 20.39% de queroseno y 14.64% de gasolina ofreciendo estandarización, eficiencia logística, diversificación de la oferta y facilidad comercio. A continuación, se exponen las propiedades del aceite obtenido en comparación con las de los combustibles comerciales, con el propósito de evaluar su idoneidad y viabilidad para su aplicación.

**Tabla 5***Caracterización de la gasolina, diésel y del aceite de HDPE a 500 °C*

<b>Parámetros</b>	<b>Gasolina</b>	<b>Diesel</b>	<b>Aceite</b>
API gravity @ 60 °F (ASTM D287)	55	38	51.44
Density @ 15 °C g/cc (ASTM D4052—16)	0.78	0.807	0.72
Kinematic viscosity @ 40 °C (cSt) (ASTM D445)	1.17	2–4.5	1.48
Gross heat of combustion (MJ/kg) (ASTM D240—17)	47.64	45.21	47.007
Pour point (°C) (ASTM D97)	1-3	6	-4.32
Flash Point (°C) (ASTM D93)	42	52	43.54
Aniline point (°C)	71	77.5	91.73

El aceite presenta una gravedad API de 51.44 generando un arranque más fácil en frío, una mejor atomización del combustible, una mejor eficiencia de la combustión en comparación al diésel y similar a la gasolina. La densidad del aceite de 0.72, confirma su ligereza en comparación al diésel y la gasolina, facilitando su manejo y almacenamiento. La viscosidad cinemática de 1.48, implicando un punto medio de fluides entre la gasolina y el diésel, resultando en un uso adecuado en aplicaciones similares a los combustibles tradicionales. El calor de combustión del aceite de 47.007, indica una liberación de energía similar durante la combustión a la gasolina y mayor al diésel, implicando un elevado rendimiento en términos de potencia y torque. El punto de fluidez del aceite de -4.32, indica una menor solidificación que la gasolina y el diésel a iguales temperaturas, garantizando una mejor operación en climas fríos. El punto de inflamación del aceite de 43.54, indica una temperatura menor al diésel y similar a la gasolina para la inflamación de los vapores en presencia de una llama. Esto asegura un nivel de seguridad comparable en términos de inflamabilidad. Por último, el punto de anilina del aceite de 91.73, sugiere una mayor aromaticidad en su composición que la gasolina y el diésel, proporcionando una mayor resistencia a la descomposición por oxidación y una mayor estabilidad térmica.

### 7.3 Composición química del gas y aceite pirolítico

La Tabla 6 exhibe los porcentajes máxicos de los gases producidos en la planta diseñada.

**Tabla 6**

*Porcentajes masicos de cada compuesto presente en el gas pirolítico a 500 °C*

<b>Numero cas</b>	<b>Compuesto</b>	<b>Formula</b>	<b>% Peso</b>
106-97-8	N-Butane	C4H10	8.813
74-82-8	Methane	CH4	1.536
74-85-1	Ethylene	C2H4	1.119
115-07-1	Propylene	C3H6	1.006
74-84-0	Ethane	C2H6	0.72
74-98-6	Propane	C3H8	0.703
630-08-0	Carbon monoxide	CO	0.496
106-99-0	Butadiene	C4H6	0.429
124-38-9	Carbon dioxide	CO2	0.292

El n-butano, el metano, el etano y el propano constituyentes presentes en un porcentaje de 8.813%, 1.536%, 0.72% y 0.703% respectivamente, se caracterizan por ofrecer una combinación óptima de atributos que incluyen un alto poder calorífico, facilidad en su almacenamiento y transporte, bajo impacto ambiental y una notable versatilidad de aplicación. La combinación de estos componentes resulta en un poder calorífico de 46.59 MJ/Kg y capacidad para ser almacenado como Gas Licuado de Petróleo.

Sin embargo, tanto el etileno, con una proporción del 1.119%, como el propileno, que alcanza un 1.006% de composición, exhiben la capacidad de emitir Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs). Además, la presencia de monóxido de carbono, representado por un 0.496%, y butadieno, con una concentración del 0.429%, constituyen compuestos reconocidos por su toxicidad y potencial carcinogénico. Por último, el dióxido de carbono, con una proporción de 0.292%, contribuye al fenómeno del efecto invernadero, lo que resalta la significativa influencia

de esta combinación de compuestos en las consideraciones ambientales y climáticas. A continuación, La Tabla 7 exhibe los porcentajes máxicos de los aceites producidos en la planta diseñada.

**Tabla 7**

*Porcentajes masicos de los principales compuestos en el aceite pirolítico a 500 °C*

<b>Numero cas</b>	<b>Compuesto</b>	<b>Formula</b>	<b>% Peso</b>
629-97-0	N-Docosane	C22H46	7.945
629-94-7	N-Heneicosane	C21H44	6.067
872-05-9	1-Decene	C10H20	5.823
638-67-5	N-Tricosane	C23H48	5.774
646-31-1	N-Tetracosane	C24H50	5.003
6765395	1-Heptadecene	C17H34	4.553
544-76-3	N-Hexadecane	C16H34	3.436
18435455	1-Nonadecene	C19H38	3.122
3452-071	1-Eicosene	C20H40	2.982
593-45-3	N-Octadecane	C18H38	2.769
629-62-9	N-Pentadecane	C15H32	2.387
629-59-4	N-Tetradecane	C14H30	2.134
112-88-9	1-Octadecene	C18H36	1.916
629-50-5	N-Tridecane	C13H28	1.806
1120214	N-Undecane	C11H24	1.68
96-37-7	Methylcycloheptane	C6H12	1.642
111-84-2	N-Nonane	C9H20	1.481
13360617	1-Pentadecene	C15H30	1.47
821-95-4	1-Undecene	C11H22	1.402
1120-361	1-Tetradecene	C14H28	1.372
124-11-8	1-Nonene	C9H18	1.24
112-41-4	1-Dodecene	C12H24	1.209

Nota. En proporciones menores el 1-Hepteno, 1-Methyl-2-Ethylbenzene, 4-Methylcyclopentene, 1-Tridecene, 1-Octene, 1-Methylcyclopentene, M-Xylene, Toluene y Cyclohexene.

La composición del aceite incluye una variedad de componentes beneficiosos que contribuyen a su idoneidad como combustible líquido. El N-Docosane y el el N-Heneicosane, presentes en un 7.945% y 6.067% respectivamente, destacan por su alto contenido energético, su estabilidad térmica y su lubricidad. El 1-Deceno ( $C_{10}H_{20}$ ), representando un 5.823%, mejora la combustibilidad del aceite y la eficiencia de la combustión. Por último, el N-Tricosane y el N-Tetracosane, presentes en un 5.774% y un 5.003% presentan propiedades anticorrosivas, lo que reduce el desgaste y la fricción en su uso.

La presencia de compuestos como el Toluene, el M-Xylene, Methylcycloheptane y Cyclohexene en el combustible líquido resulta en un aumento de la toxicidad de los gases producidos durante su combustión, así como en la complicación del manejo y la aplicación de este. Además, estos compuestos contribuyen significativamente a la formación de contaminantes atmosféricos y desestabilizan la composición del combustible. Sin embargo, es importante destacar su proporción menor al 1% por compuesto, lo que conlleva a que los riesgos asociados se encuentren en una proporción mínima y prácticamente indetectable.

## **8. Resultados del diseño de la planta**

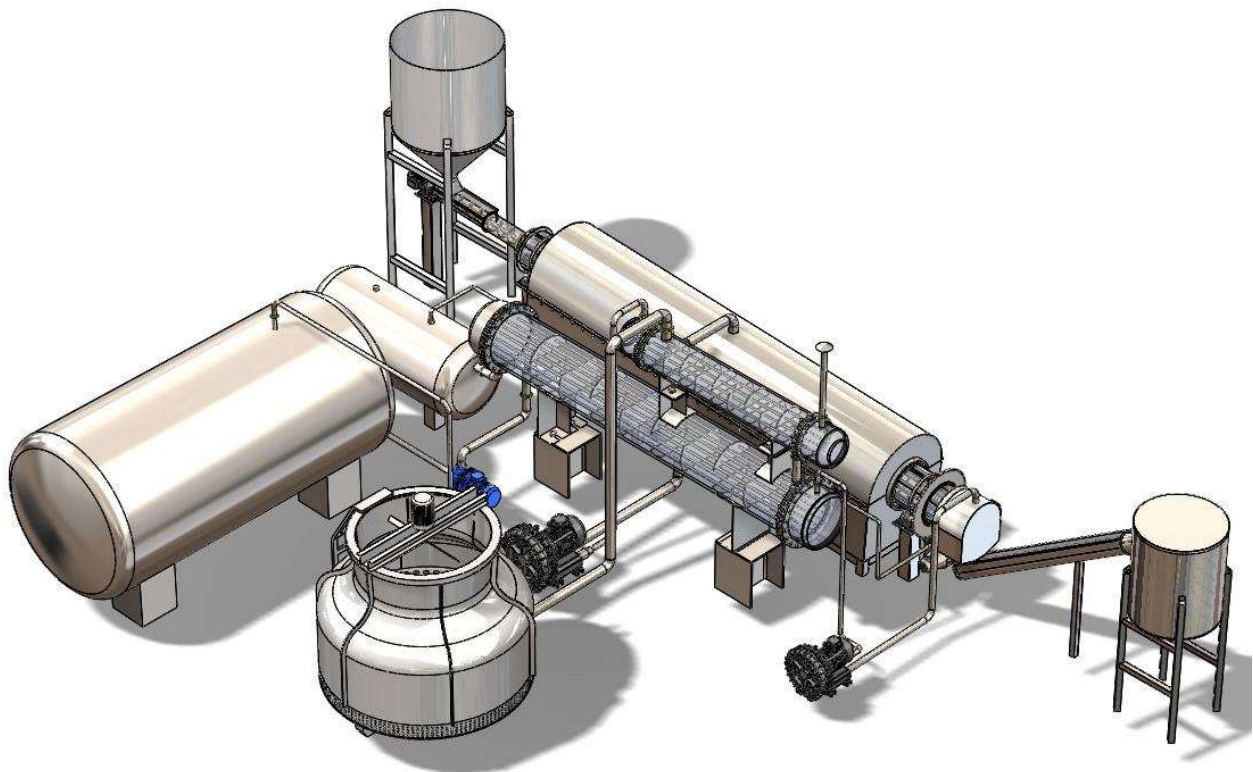
### **8.1 Características globales de la planta piloto**

El presente apartado expone los resultados concernientes al diseño de una planta piloto destinada a la pirólisis, la cual se empleó en la simulación realizada. La configuración de la planta contempló una capacidad de alimentación de 100 kg/h de HDPE triturado. En la ilustración 5 se presentan los resultados del modelamiento CAD, la Tabla 8 detalla las características principales de la planta, mientras que en las fichas técnicas se presentan las especificaciones más relevantes

de cada equipo empleado. Adicionalmente, en el Apéndice S se incluyen los planos detallados de la planta y de cada uno de sus subsistemas para una comprensión exhaustiva de su estructura y funcionamiento.

### Figura 5

*Modelo CAD de la planta piloto de pirólisis desarrollada*



El proceso de pirólisis se ejecutó en un reactor rotativo, inclinado y de funcionamiento continuo, operando a una temperatura constante de 500 °C. Para la provisión de energía, la cámara de combustión fue inicialmente alimentada con una tasa de 4.46 kg/h de gas natural durante un período de 22 minutos, tras lo cual se sustituyó esta fuente por 5.44 kg/h de gases pirolíticos no condensables. El gas pirolítico resultante fue enfriado a 50 °C mediante un intercambiador de calor de coraza y tubos refrigerado por agua, logrando así la obtención de 72.2 kg/h de aceite pirolítico, acompañado por subproductos que incluyen 12.7 kg/h de carbón-cenizas y 15 kg/h de gases no

condensables. Las estructuras destinadas al almacenamiento, como la tolva de carbón-ceniza y el separador de aceite, así como aquellas relacionadas con la alimentación del proceso, como la tolva del polietileno de alta densidad y el tanque de agua, han sido diseñadas para operar en ciclos de extracción y alimentación cada 150 minutos, asegurando así un funcionamiento eficiente y continuo del sistema.

Se ha desarrollado un sistema de expulsión de gases de combustión siguiendo las directrices establecidas por la normativa expedida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de la República de Colombia, en la Resolución Número 909 del 5 de junio de 2008. Así como se garantizó que las temperaturas en superficies de contacto cumplan con los requisitos estipulados en la ISO 13732-1. En la Tabla 8 se presenta un resumen de las características globales de la planta piloto diseñada.

**Tabla 8**

*Características principales de la planta piloto desarrollada*

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Capacidad	100 kg/h
Proceso de Trabajo	Totalmente continuo
Tamaño del Reactor	$\Phi 300*2800$ [mm]
Material del Reactor	Acero inoxidable 310S
Sistema de Conducción	Reductor 4IK30GN-AF+4GN60K, relación 4:1
Terreno (LWH)	5x8x2 [m]
Potencia	45,2 kW
Peso Total de la Planta	Aproximadamente 12 t
Número de Contenedores	Alimentación 0.4 m <sup>3</sup> -Desechos 0.2 m <sup>3</sup> -FTA-13 thru FTA-180
Materiales de Calefacción	Combustible (gases de pirólisis plástico), gas natural
Sistema de Condensación	Dos condensadores horizontales: $\Phi 40*3300$ [mm], $\Phi 270*1900$ [mm]

El diseño se centró en mejorar la eficiencia y simplicidad en el proceso. La alimentación uniforme al reactor se garantizó mediante un tornillo sin fin cargado al 100%, simplificando el proceso y reduciendo costos al mantener una atmósfera inerte sin necesidad de gas de purga y eliminando la necesidad de un ciclón. La implementación de un reactor rotativo permitió una mezcla homogénea del material, la temperatura uniforme, resultando en 81.47% y 87.3% de eficiencia térmica y de conversión respectivamente. El aislamiento de la cámara de combustión en 4 capas redujo las pérdidas térmicas al 4.13% y minimizó el desgaste de equipos por el uso de rodamientos rígidos de bolas sellados para los acoples entre el reactor, la cámara y el tornillo. El sistema de recirculación de refrigerante generó solo 1% de pérdidas de flujo por evaporación. Por último, se eliminó el consumo de gas natural a los 22 minutos al recircular los gases no condensables como combustible, alcanzando una eficiencia térmica del 95.59%.

## **8.2 Comparación planta diseñada vs plantas comerciales**

Para realizar una comparación válida de la planta de pirólisis diseñada se seleccionaron las plantas comerciales de Beston Group, Xinxiang Huayin Energy y MingJIE, empresas líderes en tecnologías de reciclaje y energía renovable. Evaluando las características, capacidades y rendimiento de estas plantas comerciales junto con la planta diseñada presentadas en la Tabla 9.

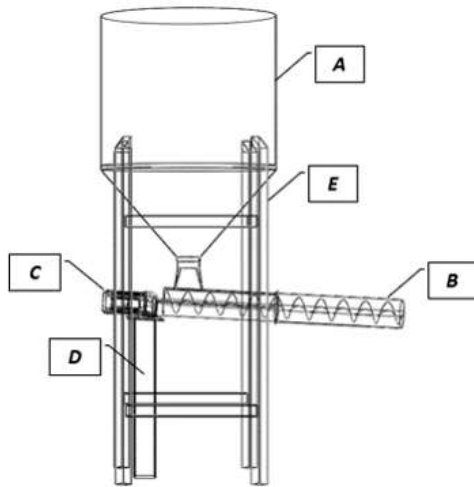
**Tabla 9***Comparación de prestaciones plantas comerciales*

<b>Empresa</b>	<b>Diseñada</b>	<b>Beston Group</b>	<b>SZG</b>	<b>MingJIE</b>
Modelo	-	BLL-30	ZQ-TP10	MLL-30T
Capacidad	100 Kg/h	1250 Kg/h	57.8 Kg/h	1666 Kg/h
Proceso de trabajo	Continuo	Continuo	Lotes cada 19 h	Continuo
Tamaño del reactor	φ300 * 2800mm	φ1800 * 18500mm	φ1800 * 13200mm	φ1600 * 26000mm
Combustible	GN, gases de pirólisis	GN, GLP, Diesel, aceite de pirólisis	GN, gases de pirólisis	GN, GLP, Diesel, aceite de pirólisis
Condensadores	2 horizontales	2 vertical	4 vertical	4 horizontales
Personal	1	6	3	4
Aceite	73%	55%	44%	60%
Carbón-ceniza	12%	30%	41%	30%
Gas	15	15	15%	10%
Tamaño de la planta	40 [m <sup>2</sup> ]	1400 [m <sup>2</sup> ]	600 [m <sup>2</sup> ]	400 [m <sup>2</sup> ]
Energía térmica	62.8 Kwh	3250 Kwh	240 Kwh	7000 Kwh

El rendimiento de aceite y gas en un 73 y 15 % respectivamente por la planta diseñada fue el mayor entre las plantas comerciales, debido a su diseño enfocado en una sola materia prima, permitió una mayor precisión de los parámetros de operación y maximizó la conversión del material. Además, el consumo energético de 0.628 Kwh\*Kgh en la planta diseñada fue el menor con respecto a las plantas comerciales debido a la menor demanda de equipos auxiliares, menor inercia térmica y menor pérdida energética en comparación con las plantas comerciales por la escala de capacidad inferior. Por último, en escalas de capacidad similar, el proceso continuo es preferible al proceso por lotes, como se evidencia entre la planta diseñada y la planta SZG, que teniendo 42.2 kgh menos, ocupa 15 veces más área y consume 3.8 más energía. A continuación, se presentan las fichas técnicas por sistemas de la planta de pirolisis diseñada.

**Figura 6**

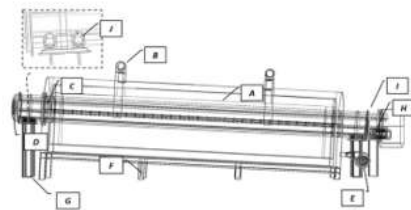
*Ficha técnica del sistema de alimentación*



Características de operación			
Temp	25°C	Presión	1 atm
Carga	100 Kg/h	Capacidad	267 Kg
Características de diseño			
Peso	372 Kg	Altura	2,1 m
Ancho	0,8 m	Largo	1,35 m
Función de equipo			
Apéndice J en el sistema de pirólisis			
Apéndice C en el sistema de alimentación			
Apéndice M en el sistema de desechos			
Apéndice R en el sistema de enfriamiento			
Norma que aplica			
CEMA 2009			
A - Tolva		B - Tornillo sinfín	
Capacidad	267 Kg	Volumen	0,43 m3
Material	Acero 304	Presión	1 atm
C - Motor tornillo sinfín			
Potencia	30 W	Velocidad	30 rpm
Voltaje	110 V	Eje	10 mm
D - Soporte motor tornillo sinfín		E - Soporte tolva	
Tipo	Tubería C	Espesor	4 mm
Material	Acero A36	Volumen	7.2 cm2
Tipo	Tubería C	Espesor	1,5 mm
Material	Acero A36	Volumen	372 cm2

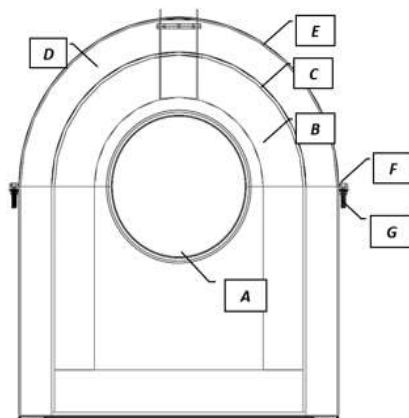
**Figura 7**

*Ficha técnica del sistema de pirólisis*



Características de operación			
Temperatura	500 °C	Presión	1 atm
Carga	100 Kg/h	Capacidad	100 Kg
Características de diseño			
Peso	1425 Kg	Altura	0,6 m
Ancho	0,8 m	Largo	4,3 m
Función de equipo			
Apéndice J en el sistema de pirólisis			
Apéndice C en el sistema de alimentación			
Apéndice M en el sistema de desechos			
Apéndice R en el sistema de enfriamiento			
Normas que aplican			
ASME SECCIÓN VIII, ISO 13732-1			

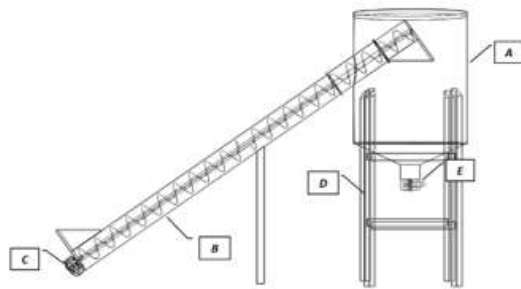
A - Cilindro reactor			
Capacidad	100 Kg	Espesor	1,9 mm
Material	Acero 310S	Longitud	3,8 m
C - Rodamientos reactor			
Tipo	Bolas	Di	30 cm
Ref.	61860	De	38 cm
Carga	172 KN	Ancho	3,8 cm
E - Quemador			
Potencia	150 kW	Motor	0,18 kW
Flujo	16 m3h	Peso	16 Kg
Volumen	94,4 cm3	Ref.	BNG-15
G - Soporte chumaceras			
Tipo	Tubería C	Espesor	4 mm
Material	Acero A36	Dimensiones	100 cm2
I - Corona-piñón			
n-corona	120	Paso	12 in
n-piñón	20	Espesor	0,5 in
B - Tubos gases de escape			
Capacidad	-	Espesor	-
Material	Acero 304	Longitud	-
D - Rodamientos tornillo sinfín			
Tipo	Bolas-sello	Di	10,5 cm
Ref.	6021-2Z	De	16 cm
Carga	73,1 KN	Ancho	2,6 cm
F - Soporte cámara de combustión			
Tipo	Tubería C	Espesor	2 mm
Material	Acero A36	Área	36 cm2
H - Motor reactor			
Potencia	30 W	Velocidad	30 rpm
Voltaje	110 V	Eje	10 mm
D - Chumaceras			
Tipo	Bolas	Diámetro	1,5 cm
Ref.	SY 15 FM	Ancho	3,2 cm
Carga	9,56 KN	Altura	3 cm



A - Cilindro reactor			
Material	Acero 310S	K	10,8 w/m°C
Espesor	1,9 mm	Ri	148,1 mm
B - Cemento refractario			
Material	CAC80AL203	K	0,15 w/m°C
Espesor	110 mm	Ri	190 mm
C - Lamina interna acero			
Material	Acero 310S	K	10,8 w/m°C
Espesor	1,9 mm	Ri	300 mm
D - Aislante			
Material	EGLASSFIBRE	K	0,03 w/m°C
Espesor	130	Ri	301,9 mm
E - Lamina externa acero			
Material	Acero 310S	K	10,8 w/m°C
Espesor	1,9 mm	Ri	431,9 mm
F - Tornillo cámara de combustión			
Material	Acero Inox.	Ref.	DIN 933
Tipo	Hexagonal	Rosca	Métrica
G - Tuerca cámara de combustión			
Material	Acero Inox.	Ref.	DIN 933
Tipo	Hexagonal	Rosca	Métrica

**Figura 8**

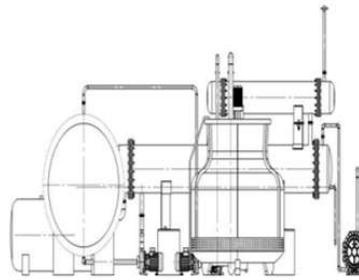
*Ficha técnica del sistema de descarga*



Características de operación			
Temperatura	500 °C	Presión	1 atm
Carga	13 Kg/h	Capacidad	523 Kg
Características de diseño			
Peso	680 Kg	Altura	1,5 m
Ancho	0,6 m	Largo	1,6 m
Función de equipo			
Apéndice J en el sistema de pirólisis			
Apéndice C en el sistema de alimentación			
Apéndice M en el sistema de desechos			
Apéndice R en el sistema de enfriamiento			
Norma que aplica			
CEMA 2009, ASME Section VIII Division 1			
A - Tolva		B - Tornillo sinfín	
Capacidad	523 Kg	Volumen	0,2 m3
Material	Acero 304	Presión	1 atm
C - Motor tornillo sinfín		Diámetro	4 in
Potencia	30 W	Pitch	2 in
Voltaje	110 V	Largo	42 in
Velocidad	15 rpm	Factor de llenado	15%
Eje	10 mm	Hélice	Helicoidal
D- Soporte tolva		Efficiencia	21%
Tipo	Tubería C	Hanger	226
Material	Acero A36	Troughs	U
Espesor	1,5 mm	Material	Acero 304
Volumen	1600 cm3	Trough Covers	Plain C
E - Válvula de mariposa		F- Separador flash	
Tipo	Brida	Tamaño	4 in
Material	Hierro	Estándar	BS 5155
Modelo	FTA-180	Tmax	232 C
Material	Acero al C	Pmax	150 psi
Exterior	Primer	Largo	46 in
Volumen	80 Gal	Diámetro	24 in

**Figura 9**

*Ficha técnica del sistema de enfriamiento*



Características de operación			
Temperatura	500 °C	Presión	1 atm
Carga	13 Kg/h	Capacidad	523 Kg
Características de diseño			
Peso	680 Kg	Altura	1,5 m
Ancho	0,6 m	Largo	1,6 m
Función de equipo			
Apéndice J en el sistema de pirólisis			
Apéndice C en el sistema de alimentación			
Apéndice M en el sistema de desechos			
Apéndice R en el sistema de enfriamiento			
Norma que aplica			
TEMA R, Resolución 909, ASME Sección VII DIV 1			

A - Torre de enfriamiento				B - Tanque de almacenamiento			
Flujo aire	7000 CFM	Perdida	1%	Capacidad	7000 L	Material	Acero Inox
Potencia	3/4 HP	Modelo	T-225	Tipo	Cilíndrico	Modelo	Karmod
Peso vacío	88 Kg	Peso lleno	420 Kg	Peso vacío	270 Kg	Peso lleno	7270 Kg
Capacidad	73 GPM	Altura	2 m	Largo	2,8 m	Uso	Industrial
Temperatura	35 C	Radio	1,2 m	Alto	2,1 m	Diámetro	1,8 m
C - Ventiladores centrífugos				D - Bomba centrífuga			
Modelo	XGB	Tipo	370-1500	Modelo	CP 650M	Potencia	1,5 HP
Voltaje	425 V	Presión	20-28Kpa	Presión	10 bar	Temperatura	35 C
E - Condensador gases de pirólisis				F - Condensador gases de combustión			
Tmedia	276 C	Presión	1,1 atm	Tmedia	445°C	Presión	1,34 atm
Carga	7500 Kg/h	Potencia	34,6 kW	Carga	96 Kg/h	Potencia	18,8 kW
Peso vacío	2024 lb	Altura	0,71 m	Peso vacío	777 lb	Altura	0,55 m
Peso lleno	2678 lb	Largo	3,3 m	Peso lleno	929 lb	Largo	1,93 m
Material	Acero al C	Diámetro	0,40 m	Material	Acero al C	Diámetro	0,27 m
Tgases entrada	502 C	Tgases salida	50.5 C	Tgases entrada	740 C	Tgases salida	150 C
Volumen coraza	9.78 Ft3	Tubos	37	Volumen coraza	2.2 Ft3	Tubos	12
Pasos	1	Longitud de tubos	112.2 in	Pasos	1	Longitud de tubos	59 in
Tipo de patrón	45 grados	Tipo de patrón	45 grados	Tipo de patrón	45 grados	Tipo de patrón	45 grados
Tipo de baffles	Segmento doble	Tipo de baffles	Segmento doble	Tipo de baffles	Segmento doble	Tipo de baffles	Segmento doble
Espaciamento baffles	11.22 in	Espaciamento baffles	5.7 in	Espaciamento baffles	5.7 in	Espaciamento baffles	5.7 in
Espesor coraza	1.3 in	Espesor coraza	1 in	Espesor coraza	1 in	Espesor coraza	1 in
Espacio soportes	67.32 in	Espacio soportes	35.4 in	Espacio soportes	35.4 in	Espacio soportes	35.4 in
Espacio tubos cabeza	132.2 in	Espacio tubos cabeza	76 in	Espacio tubos cabeza	76 in	Espacio tubos cabeza	76 in
D soportes baffles	0.37 in	D soportes baffles	0.37 in	D soportes baffles	0.37 in	D soportes baffles	0.37 in
K tubos	26.3 BTU/Ft h F	K tubos	23.16 BTU/Ft h F	K tubos	23.16 BTU/Ft h F	K tubos	23.16 BTU/Ft h F
Tagua entrada	29.4 C	Tagua entrada	33.12 C	Tagua entrada	33.12 C	Tagua entrada	33.12 C
Tagua salida	33.1 C	Tagua salida	35 C	Tagua salida	35 C	Tagua salida	35 C
Volumen tubos	1.37 Ft3	Volumen tubos	0.44 Ft3	Volumen tubos	0.44 Ft3	Volumen tubos	0.44 Ft3
Di tubos	0.45 in	Di tubos	0.45 in	Di tubos	0.45 in	Di tubos	0.45 in
De tubos	0.5 in	De tubos	0.5 in	De tubos	0.5 in	De tubos	0.5 in
Pitch	1.875 in	Pitch	1.875 in	Pitch	1.875 in	Pitch	1.875 in
Baffles	8	Baffles	8	Baffles	8	Baffles	8
Corte baffles	22.9 %	Corte baffles	22.8 %	Corte baffles	22.8 %	Corte baffles	22.8 %
Di coraza	14.7 in	Di coraza	9.75 in	Di coraza	9.75 in	Di coraza	9.75 in
Longitud de coraza	109.4 in	Longitud de coraza	57 in	Longitud de coraza	57 in	Longitud de coraza	57 in
Espacio tubos coraza	98.8 in	Espacio tubos coraza	46.6 in	Espacio tubos coraza	46.6 in	Espacio tubos coraza	46.6 in
Soportes	2	Soportes	2	Soportes	2	Soportes	2

## 9. Conclusiones

El modelo evidencio alta precisión al estimar los rendimientos, las composiciones y las propiedades de los productos. Estableciéndose como alternativa para simular el proceso de diversas plantas de pirolisis, tanto en etapa operativa como de diseño e independiente del tipo de materia prima, Ofreciendo un amplio conjunto de herramientas que facilitan la optimización y evaluación del proceso, lo que se traduce en una mejora de la eficiencia y la rentabilidad.

Los productos de aceite, gas y carbón obtenidos a partir de la planta piloto diseñada exhiben propiedades que los posicionan como alternativa frente a los combustibles tradicionales. El aceite, con un rendimiento del 72%, conocido como bunker, se dirige a los sectores energético, naviero e industrial y puede ser utilizado como materia prima para su destilación, dando lugar a fracciones de diésel, queroseno y gasolina en proporciones del 64%, 20% y 14%, respectivamente. Por otra parte, el gas permanente, con un rendimiento del 15%, denominado syngas, se dirige a su uso en turbinas, motores y quemadores industriales, así como en procesos de síntesis para la producción de compuestos como el metanol. Por último, el carbón, con un rendimiento del 12%, denominado biochar, se dirige en forma de briquetas para su combustión, así como en la fabricación de ladrillos, asfalto, pigmentos y otros insumos industriales.

La planta de pirólisis diseñada emerge como opción superior en comparación a las plantas por lotes, con un consumo promedio de 15.12% en energía térmica, 3,85% en área total y 2.04% en área del reactor por kilogramo de materia prima procesada. Además, se posiciona como alternativa competente frente las plantas continuas, con un consumo promedio de 18.47% en energía térmica, 58.82% en área total y 32.55% en área del reactor por kilogramo de materia prima procesada.

## 10. Recomendaciones

Evaluar la posibilidad de reemplazar el condensador diseñado por un proceso de destilación fraccionada con el objetivo de ampliar la gama de productos obtenidos. Esta medida permitiría no solo la extracción de aceite combustible y gas permanente, sino también la separación en diferentes fracciones, tales como aceites lubricantes, diésel, aceite de parafinas, gasolina, nafta y gas licuado de petróleo. Esta diversificación de productos permitirá una mejor adaptación a las demandas del mercado y una maximización de los ingresos derivados de su venta.

Evaluar la viabilidad de inyectar los gases de combustión directamente en el reactor en lugar de utilizar una cámara enchaquetada, evitando la adherencia del plástico en las paredes del reactor al mantenerlo suspendido en los gases de combustión y mejorando la eficiencia térmica del proceso permitiendo que el medio de calor entre en contacto directo con la materia prima. Sin embargo, la implementación de esta medida requiere la instalación de un separador ciclónico ya que el material sólido será arrastrado con el gas inerte y no se podrá separar con una cámara por densidades. Además, será necesaria la implementación de más etapas de separación, dado que el producto del reactor estaría mezclado con los gases de combustión.

### Referencias Bibliográficas

- Al-Salem, S. M. (2019). Thermal pyrolysis of high density polyethylene (HDPE) in a novel fixed bed reactor system for the production of high value gasoline range hydrocarbons (HC). *Process Safety and Environmental Protection: Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part B*, 127, 171–179. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.05.008>
- Al-Salem, S. M., & Lettieri, P. (2010). Kinetic study of high density polyethylene (HDPE) pyrolysis. *Chemical Engineering Research & Design: Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 88(12), 1599–1606. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.03.012>
- Arruda, E. B. (2007). *Comparação do Desempenho do Secador Roto-Fluidizado com o Secador Rotatório Convencional: Secagem de Fertilizantes. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.*
- Delta XGB370 side channel ring blower vortex blower.* (s/f). Hup Sheng Hardware. Recuperado el 26 de marzo de 2024, de <https://hupshenghardware.com/product/greenco-2rb8107ah19-side-channel-ring-blower-1-stage-2%C2%BD-5500w-530m3-hour-63kg-copy/>
- Ergonomics of the thermal environment Methods for the assessment of human responses to contact with surfaces Part 1: Hot surfaces.* (2006).
- Farr, J. R., & Jawad, M. H. (2010). *Guidebook for the design of ASME section VIII pressure vessels.* American Society of Mechanical Engineers.

Fernandes, N. J., Ataíde, C. H., & Barrozo, M. A. S. (2009). Modeling and experimental study of hydrodynamic and drying characteristics of an industrial rotary dryer. *Brazilian journal of chemical engineering*, 26(2), 331–341. <https://doi.org/10.1590/s0104-66322009000200010>

Friedman, S. J., & Marshal, W. R. (1949). *Studies in rotary drying*. 45, 482–573.

*Fully continuous pyrolysis plant*. (s/f). Mingjiigroup.com. Recuperado el 26 de marzo de 2024, de [https://www.mingjiigroup.com/products/Fully\\_continuous\\_pyrolysis\\_plant.html?\\_gl=1\\*\\_r\\_zrlbb\\*\\_up\\*MQ..&gclid=CjwKCAjwnv-vBhBdEiwABCYQA62P5NKLNFvQ3jSiYsrWE2M56HIH34InZCtRwyn0daHOHHXQeShkfhoCa58QAvD\\_BwE](https://www.mingjiigroup.com/products/Fully_continuous_pyrolysis_plant.html?_gl=1*_r_zrlbb*_up*MQ..&gclid=CjwKCAjwnv-vBhBdEiwABCYQA62P5NKLNFvQ3jSiYsrWE2M56HIH34InZCtRwyn0daHOHHXQeShkfhoCa58QAvD_BwE)

*Gas Burner BNG 15*. (s/f). Bntet-burner.com. Recuperado el 26 de marzo de 2024, de <https://bntet-burner.com/product/Gas-Burner/87.html>

*General Purpose Stainless Steel Tubing*. (s/f). Grainger.com. Recuperado el 26 de marzo de 2024, de <https://www.grainger.com/category/pipe-hose-tube-fittings/tube-tube-fittings/tubing/metal-tubing/corrosion-resistant-stainless-steel-tubing/general-purpose-stainless-steel-tubing?categoryIndex=2>

Ghodke, P. K., Sharma, A. K., Moorthy, K., Chen, W.-H., Patel, A., & Matsakas, L. (2022). Experimental investigation on pyrolysis of domestic plastic wastes for fuel grade hydrocarbons. *Processes* (Basel, Switzerland), 11(1), 71. <https://doi.org/10.3390/pr11010071>

- Kumar, S., & Singh, R. K. (2011). Recovery of hydrocarbon liquid from waste high density polyethylene by thermal pyrolysis. *Brazilian journal of chemical engineering*, 28(4), 659–667. <https://doi.org/10.1590/s0104-66322011000400011>
- Láminas de caucho.* (s/f). Gierregomma - Prodotti in gomma. Recuperado el 26 de marzo de 2024, de <https://www.gierregomma.com/es/product/lastre-gomma/>
- Muaz, M., & Khan, S. H. (2022). Failure mechanics analysis of AISI 4340 steel using finite element modeling of the milling process. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 57(7), 582–595. <https://doi.org/10.1177/03093247211058038>
- Nonhebel, G., & Moss, A. A. H. (1979). *El secado de sólidos en la industria química*. Reverte.
- OECD. (2022). *Global plastics outlook: Policy scenarios to 2060*. OECD.
- Olazar, M., Lopez, G., Arabiourrutia, M., Elordi, G., Aguado, R., & Bilbao, J. (2008). Kinetic modelling of tyre pyrolysis in a conical spouted bed reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 81(1), 127–132. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2007.09.011>
- Pedrollo S.p.A.* (s/f). Com.co. Recuperado el 26 de marzo de 2024, de <https://www.pedrollo.com.co/es/cp-037-22-kw-electrobombas-centrifugas/245>
- Planta de pirólisis continua.* (2022, diciembre 7). Beston Eco Grupo. <https://www.bestoneco.com/planta-de-pirolisis-continua/>

*Plantas de pirólisis continua.* (s/f). Made-in-china.com. Recuperado el 26 de marzo de 2024, de [https://es.made-in-china.com/co\\_zhongqing/product\\_Continuous-Pyrolysis-](https://es.made-in-china.com/co_zhongqing/product_Continuous-Pyrolysis-Plant_egiyinyyy.html)

[Plant\\_egiyinyyy.html](https://es.made-in-china.com/co_zhongqing/product_Continuous-Pyrolysis-Plant_egiyinyyy.html)

*Plásticos y cambio climático: ¿una relación saludable?* - *United Nations Development Programme.* (s/f). Exposure. Recuperado el 26 de marzo de 2024, de <https://stories.undp.org/plasticos-y-cambio-climatico>

*Reducción concéntrica, extremos soldables, 1 1/2" x 1" SS304 (Act 02-24) - Repuestos Industriales ??* (s/f). Repuestos Industriales ?? Recuperado el 26 de marzo de 2024, de <https://mercadoindustrialec.com/tienda/reduccion-concentrica-extremos-soldables-1-1-2-x-1-ss304-act-02-24/>

*Tanque de Agua Inoxidable de 7.000 Litros Precios y Características.* (s/f). Karmodplastic.com. Recuperado el 26 de marzo de 2024, de <https://karmodplastic.com/es/tanque-de-agua-inoxidable-de-7000-litros>

*Tubo 1.1/4X1M Presión 21-200 Psi.* (s/f). Com.co. Recuperado el 26 de marzo de 2024, de <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/22750/tubo-11-4x1m-presion-21-200-psi/22750/>

*Válvula de mariposa-4-Grupo WESDOM.* (s/f). Wsd-valve.com. Recuperado el 26 de marzo de 2024, de <https://es.wsd-valve.com/products/Butterfly-Valve/page/4>

Williams, P. T. (2013). Pyrolysis of waste tyres: A review. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 33(8), 1714–1728. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.05.003>

*World Energy Outlook 2009*. (s/f). IEA. Recuperado el 26 de marzo de 2024, de <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2009>

(S/f-a). Westank.com. Recuperado el 26 de marzo de 2024, de <https://www.westank.com/specialty-tanks/flash-tanks/>

(S/f-b). Shopify.com. Recuperado el 26 de marzo de 2024, de [https://cdn.shopify.com/s/files/1/1501/2204/files/Model\\_T-225\\_Tower\\_Specifications\\_1.pdf?v=1671199472](https://cdn.shopify.com/s/files/1/1501/2204/files/Model_T-225_Tower_Specifications_1.pdf?v=1671199472)