



**Desarrollo y evaluación de la reacción de pirólisis de polietileno (PE) junto con biomasa
mediante un software de simulación para la obtención de gas de síntesis**

Encalada Soria, Dennys Fabricio

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Petroquímica

Trabajo de Unidad de Integración Curricular, previo a la obtención del título de Petroquímico

Ing. Sayavedra Delgado, Jonathan Javier. Msc

15 de agosto del 2022

Latacunga

Reporte de Verificación de Contenido

COPYLEAKS

Trabajo de UIC Encalada.docx

Scanned on: 18:6 August 14, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text



Verifique el autenticidad por:
JONATHAN JAVIER
SAYAVEDRA DELGADO

Identical Words	364
Words with Minor Changes	104
Paraphrased Words	0
Omitted Words	1991

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Jonathan'.

Ing. Sayavedra Delgado, Jonathan Javier. Msc

C.C.: 0502865850



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Petroquímica

Certificación

Certifico que el trabajo de Unidad de Integración Curricular: **“Desarrollo y evaluación de la reacción de pirólisis de polietileno (PE) junto con biomasa mediante un software de simulación para la obtención de gas de síntesis”** fue realizado por el señor **Encalada Soria Dennys Fabricio**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 15 de agosto del 2022.

Ing. Sayavedra Delgado, Jonathan Javier. Msc

C.C.: 0502865850



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera De Petroquímica

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Encalada Soria Dennys Fabricio**, con cédula de ciudadanía n°0503641425, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de Unidad de Integración Curricular: **“Desarrollo y evaluación de la reacción de pirólisis de polietileno (PE) junto con biomasa mediante un software de simulación para la obtención de gas de síntesis”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 15 de agosto del 2022.

Encalada Soria, Dennys Fabricio

C.C.: 0503641425



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Petroquímica

Autorización de Publicación

Yo, **Encalada Soria Dennys Fabricio**, con cédula de ciudadanía n°0503641425, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de Unidad de Integración Curricular: “**Desarrollo y evaluación de la reacción de pirólisis de polietileno (PE) junto con biomasa mediante un software de simulación para la obtención de gas de síntesis**” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 15 de agosto del 2022.

Encalada Soria, Dennys Fabricio

C.C.: 0503641425

Dedicatoria

Este estudio presentado como trabajo de unidad de integración curricular está dedicado como agradecimiento a mi madre, Mariana Soria, quien con su amor y su apoyo incondicional ha sido el pilar y el fundamento para el cumplimiento de cada una de mis metas. Gracias por enseñarme con su ejemplo que las noches largas y agotadoras tienen el propósito de construir nuestros sueños.

A la doctora PhD Isabel Pazmiño Mayorga, quien con su organización, calidad pedagógica y conocimientos proporcionados durante su periodo educativo instituyeron las bases del aprendizaje a lo largo de mi etapa universitaria.

A todos los estudiantes que cursan la carrera de Petroquímica que con dedicación, esfuerzo y perseverancia se esmeran por obtener los conocimientos necesarios que permitan desarrollar futuros proyectos petroquímicos que contribuyan al cambio de la matriz productiva del país.

Encalada Soria, Dennys Fabricio

Agradecimiento

Extiendo mis sinceros agradecimientos a la Carrera de Ingeniería Petroquímica de la Universidad de las Fuerzas Armadas Sede Latacunga, al personal docente por su enseñanza, paciencia y dedicación. En especial al Ing. Javier Sayavedra, quien, permitió la realización del presente trabajo y sirvió de guía en el desarrollo del mismo. Sin su gran ayuda nada de esto hubiese sido posible. A nuestros compañeros, que se convirtieron en grandes amigos. Y a todas las personas que hicieron posible que este sueño se convierta en realidad.

Encalada Soria, Dennys Fabricio

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Carátula.....	1
Reporte de Verificación de Contenido	2
Certificación	3
Responsabilidad de Autoría	4
Autorización de Publicación	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Índice de Contenidos	8
Índice de Tablas	12
Índice de Figuras	13
Resumen	15
Abstract.....	16
Capítulo I: Introducción	17
Antecedentes.....	17
Planteamiento del Problema.....	18
Justificación e Importancia.....	19
Objetivos	21
<i>Objetivo General.....</i>	<i>21</i>
<i>Objetivos Específicos</i>	<i>21</i>
Hipótesis	22
Variables de Investigación.....	22

<i>Variable independiente</i>	22
<i>Variable dependiente</i>	22
Capítulo II: Marco Teórico.....	23
Pirólisis.....	23
<i>Copirólisis</i>	23
<i>Ventajas del Proceso de Copirólisis</i>	23
El Polietileno (PE)	24
<i>Polietileno de Baja Densidad (LDPE)</i>	24
<i>Polietileno de Alta Densidad (HDPE)</i>	25
Biomasa.....	28
<i>Clasificación de la Biomasa</i>	28
<i>Composición de la Biomasa</i>	30
Gas de Síntesis.....	32
Diseño del Proceso.....	33
<i>Etapas del diseño del Proceso</i>	33
<i>Síntesis del Proceso</i>	35
Pasos para la síntesis de Procesos.....	35
<i>Diagramas de Flujo</i>	36
Capítulo III: Metodología	38
Descripción general del proceso.	38
<i>Corrientes de Alimentación del Proceso</i>	38

Obtención de Gas de Síntesis	42
Diagramas de Flujo de Procesos	42
<i>Diagramas de Flujo de Bloques (BFD)</i>	42
<i>Diagramas de Flujo de Proceso (PFD)</i>	43
Reacciones Químicas del Proceso	44
<i>Reacción de Pirólisis de Polietileno de baja densidad (LDPE)</i>	44
<i>Reacciones de Pirólisis de Biomasa</i>	45
<i>Reacciones de Gasificación</i>	46
Simulación.	47
<i>Selección del modelo termodinámico</i>	47
<i>Ingreso de componentes no convencionales en el Software de Simulación</i>	48
<i>Simulación del reactor de pirólisis de Biomasa</i>	49
<i>Simulación del reactor de pirólisis de LDPE</i>	51
<i>Simulación del reactor de copirólisis de LDPE junto con Biomasa</i>	53
<i>Simulación de separadores</i>	55
Capítulo IV: Resultados y Discusiones.....	57
Fuente de Biomasa del Proceso.	57
Proceso de obtención de gas de síntesis.....	58
Balance de masa del proceso.....	59
Análisis de Sensibilidad.....	60
Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones.....	69

Conclusiones.....	69
Recomendaciones	71
Bibliografía	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Propiedades generales del HDPE</i>	27
Tabla 2 <i>Clasificación de la Biomasa basado en el origen y propiedades</i>	29
Tabla 3 <i>Composición de Lignina, celulosa y hemicelulosa de algunas fuentes de Biomasa en el Ecuador</i>	32
Tabla 4 <i>Pasos en la Síntesis de Procesos</i>	36
Tabla 5 <i>Propiedades termodinámicas de los residuos fibrosos de la Palma Africana</i>	38
Tabla 6 <i>Propiedades termodinámicas del bagazo de Caña de Azúcar</i>	40
Tabla 7 <i>Propiedades termodinámicas no convencionales del LDPE</i>	41
Tabla 8 <i>Distribución de Productos de Pirólisis de LDPE</i>	45
Tabla 9 <i>Reacciones de Gasificación para la obtención de Gas de Síntesis</i>	47
Tabla 10 <i>Datos ingresados al reactor de Pirólisis (PIROBIO)</i>	50
Tabla 11 <i>Datos ingresados al Secador y Reactor de Pirólisis de LDPE</i>	52
Tabla 12 <i>Condiciones de Operación del reactor de Copirólisis</i>	54
Tabla 13 <i>Flujo másico de Gas de Síntesis producto de la copirólisis de diferentes biomosas</i>	57
Tabla 14 <i>Balance de masa</i>	59
Tabla 15 <i>Flujo másico de Biomasa de Caña de Azúcar resultado del análisis de sensibilidad</i> 61	61
Tabla 16 <i>Análisis de sensibilidad de la temperatura en el bloque COPIROL</i>	64
Tabla 17 <i>Análisis de sensibilidad en la corriente de aire</i>	66
Tabla 18 <i>Análisis de sensibilidad de la corriente de Agua (S7)</i>	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Fórmula estructural esquelética simulada para el LDPE.....</i>	25
Figura 2. <i>Fórmula estructural esquelética simulada para el HDPE.....</i>	26
Figura 3. <i>Diagrama de bloque (BFD) del proceso de pirólisis.....</i>	43
Figura 4. <i>Mecanismo de Reacción de la Biomasa.....</i>	46
Figura 5. <i>Ventana de Selección de componentes.....</i>	48
Figura 6. <i>Ingreso de propiedades no convencionales de los componentes.....</i>	49
Figura 7. <i>Corriente de alimentación de Biomasa al reactor de Pirólisis (PIROBIO).....</i>	50
Figura 8. <i>Ventana de reacciones definidas en el reactor de Pirólisis (PIROBIO).....</i>	51
Figura 9. <i>Sistema de Secado y Reacción de Pirólisis de LDPE.....</i>	52
Figura 10. <i>Ventana de reacciones definidas en el Reactor de LDPE (PIROPE).....</i>	53
Figura 11. <i>Definición del parámetro de cálculo en el reactor de Copirólisis.....</i>	53
Figura 12. <i>Corrientes de entrada de O₂ y Aire en el reactor de Copirólisis (COPIRO).....</i>	54
Figura 13. <i>Ventana de Reacciones de Gasificación definidas en el reactor de Copirólisis (COPIRO).....</i>	55
Figura 14. <i>Ventana de separación del efluente del reactor de Pirólisis de LDPE.....</i>	56
Figura 15. <i>Ventana de separación del efluente del reactor de Pirólisis de Biomasa.....</i>	56
Figura 16. <i>Proceso de obtención de Gas de síntesis mediante la copirólisis de LDPE y residuos de Caña de Azúcar.....</i>	58
Figura 17. <i>Resultados del Análisis de sensibilidad de flujos de corriente LDPE.....</i>	60
Figura 18. <i>Curva de sensibilidad de flujo de LDPE vs Composición de H₂ en la corriente S₄.....</i>	61
Figura 19. <i>Resultados de análisis de sensibilidad de flujos de corriente de Biomasa de Caña de Azúcar.....</i>	62
Figura 20. <i>Curva de sensibilidad de flujo de Biomasa de caña de Azúcar vs composición de H₂ en la corriente S₄.....</i>	62

Figura 21. <i>Resultados de los análisis de sensibilidad presión de reactor de copirólisis de Biomasa y LDPE.</i>	63
Figura 22. <i>Curva de sensibilidad Presión de Reacción de Copirólisis vs Composición de H2.</i>	64
Figura 23. <i>Curva de sensibilidad de temperatura de reacción en el reactor de copirólisis vs composición de H2.</i>	65

Resumen

En este trabajo se desarrolló y evaluó la reacción de pirólisis de polietileno (PE) junto con biomasa mediante un software de simulación para la obtención de gas de síntesis, tomando como base para el desarrollo de la misma, procesos que ya se encuentran registrados en diferentes fuentes bibliográficas. Se simuló el proceso utilizando las propiedades no convencionales de residuos de bagazo de caña de azúcar y palma africana que son las fuentes de biomasa con mayor volumen en Ecuador. Así mismo, se utilizaron las propiedades no convencionales de residuos de polietileno de baja densidad (LDPE). Se describió el proceso de pirólisis de LDPE junto con biomasa. Para lo cual se estableció las operaciones unitarias adecuadas esquematizándolas en diagramas de bloques y flujo (BDF y PFD). De la misma forma, se realizó un análisis de sensibilidad en el reactor de copirólisis, esto con el fin de determinar la influencia de la presión y temperatura en el rendimiento de H₂. Por otra parte, se calcularon los balances de masa y energía a lo largo del todo el proceso diseñado. Se determinaron todos flujos másicos de entrada y salida, de cada componente en todas las operaciones unitarias esquematizadas en los diagramas de flujo y bloques, en base a al flujo de alimentación de la fuente de biomasa óptima para el proceso.

Palabras clave: Pirólisis, Biomasa, Polietileno, Simulación – Pirólisis – Biomasa

Abstract

In this work, the pyrolysis reaction of polyethylene (PE) together with biomass was developed and evaluated using simulation software to obtain synthesis gas, taking as a basis for its development, processes that are already registered in different Bibliographical sources. The process was simulated using the unconventional properties of sugarcane and African palm bagasse residues, which are the biomass sources with the highest volume in Ecuador. Likewise, the unconventional properties of low-density polyethylene (LDPE) waste were used. The pyrolysis process of LDPE together with biomass was described. For which the appropriate unit operations were established by schematizing them in block and flow diagrams (BDF and PFD). In the same way, a sensitivity analysis was carried out in the copyrolysis reactor, in order to determine the influence of pressure and temperature on the H₂ yield. On the other hand, the mass and energy balances were calculated throughout the entire designed process. All input and output mass flows were determined for each component in all the unit operations outlined in the flow and block diagrams, based on the feed flow of the optimum biomass source for the process.

Key words: Pyrolysis, Biomass, Polyethylene, Simulation – Pyrolysis – Biomass

Capítulo I

Introducción

Antecedentes

El consumo acelerado de los combustibles fósiles a nivel mundial y la necesidad de cumplir con los desafíos energéticos y ambientales ha permitido el crecimiento y desarrollo de las energías renovables. Actualmente los recursos más utilizados para la obtención de energía renovable son la biomasa, energía eólica, hidroeléctrica, geotérmica y solar. (Bernard Uzoejinwaa et al., 2018)

El potencial de la actividad agrícola en el Ecuador, genera una cantidad considerable de desechos provenientes de Biomasa (Delgado et al., 2020). Es por este motivo que su tratamiento puede producir energía limpia y renovable. En la actualidad los cultivos de caña de azúcar, palma africana y banano son la mayor fuente de Biomasa. De los cuales, la palma africana solo se recicla un 25% de sus desechos. (Cañarte & Rodríguez, 2020)

Bernard Uzoejinwaa et al. (2018), destacan que la biomasa es la única fuente de energía renovable que se puede convertir en varias formas de combustibles: líquido (biocombustible o bio aceite), sólido (carbón vegetal) y gas. Por esta razón, muestra una ventaja significativa frente a otras fuentes de energía en términos de disponibilidad, comercialización y transporte.

Es así como, la biomasa es objeto de estudio y materia prima de desarrollo en la aplicación de nuevos métodos que ayudan a mitigar los gases de efecto invernadero. En conjunto con la interacción de residuos plásticos y la aplicación de métodos termoquímicos, se puede maximizar la obtención de productos de interés, como el gas de síntesis (Syngas). Siendo este último muy utilizado en aplicaciones de síntesis química, generación de energía y producción de biocombustibles. (Xu et al., 2021)

Xu et al. (2021), en su investigación destacan que un método termoquímico prometedor para la obtención de energía utilizando como materia prima biomasa y residuos plásticos es la Pirólisis. Siendo este último, un método de aplicación sustentable en la generación de combustibles gaseosos cuando reacciona la lignocelulosa contenida en la biomasa con los desechos plásticos.

Es necesario resaltar que el proceso de Pirólisis, utiliza las fuentes de biomasa como recurso principal para la formación de carbón activado, que cumple la función de soporte para el catalizador. Es por esta razón que en su caso de estudio Xu et al. (2021), mencionan que las fuentes de Biomasa más utilizadas que proporcionan carbón activado son la cáscara de nuez, bagazo de caña de azúcar, tallo de algodón, aserrín y cáscara de coco.

Planteamiento del Problema

Jin et al. (2022), mencionan en su caso de estudio que el proceso de Pirólisis de Biomasa y residuos plásticos de Polietileno (PE) posee altos rendimientos para combustibles líquidos, en un valor de 69.82%, sin embargo, para el caso de combustibles gaseosos el rendimiento actual se encuentra insatisfecho con un valor del 28.84%.

No obstante, en la investigación proporcionada por Bobek-Nagy et al. (2020), hacen referencia al incremento de hidrocarburos gaseosos, específicamente (Gas de Síntesis rico en H₂) utilizando polietileno de baja densidad debido al uso de este último en muchos productos comercializados en Europa y Asia. La investigación se realiza evaluando el proceso con carbón activado (soporte de catalizador), agua de alimentación y el contenido de catalizador de Níquel; obteniendo en sí el aumento del rendimiento de gas de síntesis rico en H₂.

De las evidencias anteriores, es necesario realizar un estudio no experimental mediante el desarrollo de una simulación para evaluar la reacción de pirólisis de polietileno (PE) junto con biomasa y de las variables que permitan incrementar el rendimiento de gas de síntesis.

Justificación e Importancia

El crecimiento de residuos plásticos es una problemática que afecta al medio ambiente debido al uso en muchos productos que utilizan los seres humanos. Según Ricardo Estévez (2019) el mayor productor de plástico en el mundo es China seguido de Europa en donde se concentra alrededor de dos tercios de la producción. Al respecto, en Ecuador los residuos plásticos representan para el año 2020 un 11% tan solo en el área urbana donde se concentra la mayor cantidad de población. (Morán, 2021)

En el Ecuador el mecanismo utilizado para la importación de desechos plásticos es la partida 3915. En el artículo publicado por Solíz & Morán (2021) mencionan que los desechos correspondientes a polímeros de etileno son los que más se importan con un valor correspondiente al 60% de los desechos plásticos y un valor en peso aproximado a los 25 millones de kilos entre los años 2018, 2019 y 2020. En consecuencia, es necesario aplicar procesos que permitan utilizar los residuos de polímeros de polietileno.

Bernard Uzoejinwaa et al. (2018), mencionan en su investigación que la aplicación de la Pirólisis en el campo de los procesos sustentables tiene la capacidad de minimizar la toxicidad y el impacto ambiental que generan los combustibles fósiles. Específicamente utilizando la biomasa y los residuos plásticos provenientes de materiales poliméricos para la obtención de combustibles líquidos, sólidos y gaseosos.

De manera general las fuentes de Biomasa están constituidas por tres componentes principales derivados de los carbohidratos (biomoléculas): celulosa (30–60 %), hemicelulosa (polisacáridos) (20–35 %) y lignina (15–30 %), junto a otros elementos en menor composición, cada uno en proporciones diferentes (Bernard Uzoejinwaa et al., 2018). Es por esta razón que los procesos de pirólisis de biomasa son técnica y económicamente viables al utilizar materia prima renovable.

Así mismo, el proceso de la Pirólisis permite mejorar el rendimiento y la demanda de los productos de interés. Debido a esto permite el estudio y diseño de catalizadores más selectivos y reutilizables. En ese mismo contexto permite mitigar el desecho de metales tóxicos y genera un ahorro económico y energético. (Bobek-Nagy et al., 2020)

De las evidencias anteriores, en el Ecuador el uso de procesos de Pirólisis de Biomasa es prometedor ya que según el Instituto Nacional de estadísticas y Censos (INEC) la actividad agropecuaria va en crecimiento llegando a un valor de 5.3 millones de hectáreas, siendo potencial el cultivo de caña de azúcar, banano y palma africana; con un total de 16,793,642 toneladas métricas al año. (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), 2019)

Aguilar Romero (2019) en su caso de estudio menciona que en el Ecuador la caña de azúcar, el banano y la palma africana generan gran cantidad de desechos. El caso más

interesante se refiere a la caña de azúcar que genera una cantidad de residuos de 793283.38 toneladas al año generando un potencial energético de alrededor de 5.12 MWh/T. Por lo que se considera una fuente de Biomasa viable y económica.

En apartados anteriores se mencionó el bajo rendimiento de productos gaseosos en los procesos de Pirólisis de Biomasa con residuos plásticos. De tal manera que para dar solución a esta problemática se propone el desarrollo del presente proyecto, el cual genera una alternativa, a través del desarrollo y evaluación de la reacción de pirólisis de polietileno (PE) junto con biomasa mediante un software de simulación. Proyecto en el que se incluye presentar los diagramas de flujo de proceso, generar las reacciones químicas y balances presentes en los sistemas de reacción y optimizar las condiciones de operación del proceso de pirólisis. Con la finalidad de mejorar el rendimiento de Gas de Síntesis y presentar un estudio que puede ser utilizado en la construcción de proyectos petroquímicos en el país.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar y evaluar la reacción de pirólisis de polietileno (PE) junto con biomasa mediante un software de simulación para la obtención de gas de síntesis.

Objetivos Específicos

Determinar las condiciones de operación óptimas de proceso a partir de un software de simulación que permitan la generación de productos con valor agregado.

Generar balances y reacciones presentes en los sistemas de reacción y demás operaciones unitarias necesarias para el proceso.

Realizar la simulación del proceso de pirólisis utilizando un software con los datos y cálculos obtenidos en los objetivos planteados.

Hipótesis

¿Será posible obtener un máximo rendimiento de Gas de Síntesis a partir de la Pirólisis de Biomasa con PE (Polietileno)?

Variables de Investigación

Variable independiente

Fuente de Biomasa.

Propiedades no convencionales termodinámicas de la Biomasa

Flujo másico de Biomasa a la entrada del sistema de reacción.

Propiedades no convencionales termodinámicas de los residuos de polietilenos.

Flujo másico de Polietileno a la entrada del sistema de reacción.

Condiciones de Temperatura y Presión en los sistemas de Reacción.

Variable dependiente

Composición a la salida de la unidad de separación de Gas de Síntesis (SYNGAS)

Capítulo II

Marco Teórico

Pirólisis

La pirólisis es un proceso termoquímico utilizado en la ruptura de cadenas poliméricas largas, a altas temperaturas y en ausencia de oxígeno, con un potencial uso en la obtención de hidrocarburos cortos a partir de Biomasa que se utilizan como combustibles alternativos.

(Iswadi et al., 2017)

Copirólisis

La copirólisis es un proceso en el cual reaccionan dos o más elementos con el objetivo de incrementar propiedades termodinámicas de productos obtenidos. Un ejemplo, es el proceso de copirólisis de biomasa y residuos plásticos que permite mejorar la cantidad de productos obtenidos y la calidad de los mismos en términos de alto valor calorífico, debido a que los plásticos sintéticos son productos petroquímicos con alto contenido de carbono e hidrógeno, que tienen poco o nada composición de oxígeno. (Bernard Uzojinwaa et al., 2018)

Ventajas del Proceso de Copirólisis

Los casos de estudio que involucran el proceso de copirólisis muestran la simplicidad, eficacia y eficiencia en las operaciones para la producción de valiosos combustibles líquidos con una menor formación de depósitos de coque. Además, que no requieren ningún solvente, catalizador o cualquier cantidad de hidrógeno, que puede costar incluso más que el propio

aceite. Una ventaja significativa es que la copirólisis se puede operar en ausencia de presión de hidrógeno y tiempo de residencias cortos. (Bernard Uzoejinwaa et al., 2018)

El Polietileno (PE)

El polietileno es un polímero termoplástico que se puede subdividir en polietileno de baja densidad (LDPE) y polietileno de alta densidad (HDPE). Los polietilenos son materiales inertes, que difícilmente se degradan en el medio ambiente, incluso después de estar enterrado durante varios años en vertederos. En la investigación realizada por Ghatge et al. (2020) mencionan que una lámina de polietileno se degrada parcialmente y posee una pérdida de peso insignificante cuando se mantiene en contacto con suelo húmedo por un periodo de 12 a 32 años. Esto se debe a su insolubilidad en agua, la hidrofobicidad a causa de la presencia de las cadenas lineales existentes entre átomos de carbono, el grado de cristalinidad y su alto peso molecular. (Ghatge et al., 2020)

Polietileno de Baja Densidad (LDPE)

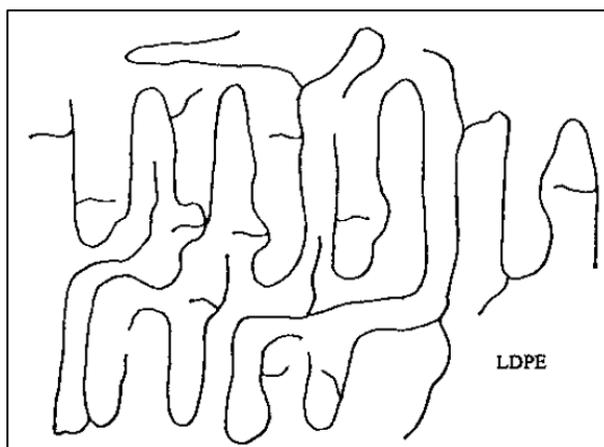
El LDPE es un polímero ramificado de baja densidad que se forma en condiciones de alta presión. Sus cadenas poliméricas no pueden compactarse, dejando huecos y produciendo posteriormente un material con una densidad más baja.

El LDPE comercial normalmente posee en su estructura un valor de 40 y 150 ramificaciones de grupos alquilo cortas por cada 1000 unidades de etileno. Su proceso de producción se realiza empleando altas presiones (15.000 a 50.000 psi y temperaturas de hasta 350 °C). Tiene una densidad de aproximadamente 0,912 a 0,935 g/cm³. Debido a la presencia de ramificaciones que posee como se ilustra en la Figura 1, el LDPE es un polímero amorfo y

cuando se agrupa formando láminas pueden permitir el paso de líquidos y gases. Por esta razón posee baja cantidad de cristalinidad, con un punto de fusión bajo de aproximadamente 100 °C, lo que lo hace inadecuado para su uso con materiales que requieren esterilización mediante el uso de agua hirviendo. El LDPE tiene una proporción de aproximadamente 10 ramas cortas por cada rama larga. De manera general el LDPE se usa en productos de embalaje, bolsas, láminas industriales, tuberías y tubos, películas, botes de basura, contenedores industriales, artículos para el hogar, etc. (Carraher & Seymour, 2008)

Figura 1

Fórmula estructural esquelética simulada para el LDPE



Nota. El gráfico representa una simulación de la estructura ramificada del LDPE, obsérvese la cantidad alta de ramificaciones que posee. Tomado de *Seymour/Carraher's polymer chemistry* (p. 310) por Carraher, C. E., & Seymour, R. B., 2008, CRC Press.

Polietileno de Alta Densidad (HDPE)

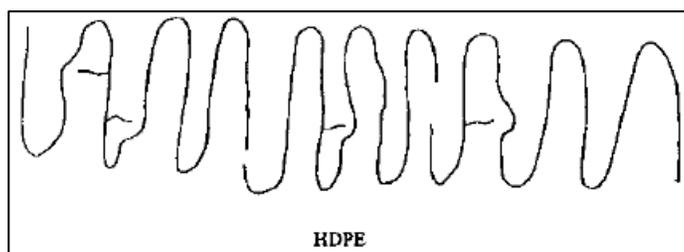
Carraher & Seymour (2008) definen al HDPE como un polímero con baja cantidad de ramificaciones en comparación con el LDPE. En su producción se destaca el uso de

catalizadores organometálicos, como los catalizadores Ziegler-Natta o Phillips. Este polímero posee menos de 15 ramificaciones de grupos alquilo cortas por 1000 unidades de etileno como se muestra en la Figura 2, bajo grado de ramificación, mayor cristalinidad (generalmente hasta el 90 %), mayor densidad ($0,96 \text{ g/cm}^3$). En cuanto a sus propiedades físicas se pueden destacar su dureza, rigidez, propiedades de barrera, punto de fusión de alrededor de $130 \text{ }^\circ\text{C}$ y resistencia a la tracción. El HDPE de bajo peso molecular es un sólido parecido a la cera, mientras que el HDPE “típico” es un plástico resistente.

El HDPE “típico” se usa en productos moldeados por soplado: botellas, latas, bandejas, tambores, tanques y baldes; productos moldeados por inyección: artículos para el hogar, juguetes, recipientes para alimentos, estuches, cubos y cajas; películas, tuberías, bolsas, conductos, revestimiento de alambres y cables, espuma, aislamiento para cables coaxiales y de comunicación. Mientras que el HDPE de bajo peso molecular se usa en: recubrimientos en aerosol, emulsiones, tintas de impresión, pulidores de cera y crayones.

Figura 2

Fórmula estructural esquelética simulada para el HDPE



Nota. El gráfico representa una simulación de la estructura ramificada del HDPE, obsérvese la cantidad baja de ramificaciones que posee y un mayor factor de empaquetamiento. Tomado de *Seymour/Carraher's polymer chemistry* (p. 309) por Carraher, C. E., & Seymour, R. B., 2008,

CRC Press.

En la Tabla 1 se detallan las propiedades generales del HDPE que incluyen propiedades físicas y químicas.

Tabla 1

Propiedades generales del HDPE

Nombre Común	Polietileno de alta densidad, poli(etileno-co-1-hexeno), poli(etileno-co-1-octeno)
Nombre IUPAC	Polietileno
Acrónimo	HDPE
Fórmula Linear	$-[-CH_2CH_2-]_n-$
Método de Síntesis	Polimerización en suspensión, polimerización gas-sólido.
Temperatura de Polimerización	80-100°C
Presión de Polimerización	0.1 Mpa
Calor de Polimerización	93.6 kJ/mol
Peso molecular promedio en masa (g/mol)	Bajo: 1000-100000 (moldeo por inyección). Medio: 100000-180000 (moldeo por soplado, película, tubería, hoja). Alto: 250000-750000 (moldeo por soplado de piezas grandes, películas delgadas de alta resistencia).
Cristalinidad	60-90%

Nota. Esta tabla ha sido reproducida de Phenolic Resins: A Century of Progress (p.12) por Pilato, 2010, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Biomasa

La Biomasa hace referencia a la materia formada por los organismos biológicos que pueblan el planeta. Pero que la integran además los organismos muertos y materia que ya no es parte de un organismo vivo debido a la fuente de carbono que representan. En este sentido, se integran como fuentes de biomasa los desechos emitidos por los animales y los que son acumulados por las actividades humanas. (Pérez, 2016)

La materia procedente de la Biomasa se puede tratar a partir de diferentes procesos según su naturaleza. En efecto, una misma fuente de biomasa se puede utilizar para obtener productos en diferentes fases (sólido, líquido o gaseosos). Un ejemplo es la madera que puede utilizarse en procesos de conversión térmica de baja temperatura para obtener metanol o de alta temperatura para obtener una mezcla de gases que contiene gas de síntesis (Pérez, 2016).

Clasificación de la Biomasa

En el caso de estudio propuesto por Khan et al. (2009) se propone clasificar a la Biomasa de acuerdo a su origen y sus propiedades como se especifica en la Tabla 2.

Tabla 2

Clasificación de la Biomasa basado en el origen y propiedades

Basado en el Origen	Basado en sus Propiedades
Residuos primarios: Subproductos de cultivos alimentarios y productos forestales (madera, paja, cereales, maíz, etc.).	Madera y combustible leñoso (madera dura y blanda, madera de demolición).
Residuos secundarios: subproductos del procesamiento de biomasa para la producción de productos alimenticios o materiales de biomasa (aserraderos y fábricas de papel, industrias de alimentos y bebidas, semilla de albaricoque, etc.).	Combustibles herbáceos (paja, pastos, tallos, etc.).
Residuos terciarios: subproductos de materias primas derivadas de biomasa usada (residuos y madera de demolición, etc.).	Residuos (lodos de depuradora, combustible derivado de residuos (RDF), etc.).
	Derivados (residuos de industrias papeleras, alimentarias, etc.).
Cultivos energéticos.	Acuático (kelp, etc.).
	Cultivos energéticos (específicamente cultivados con fines energéticos).

Nota. Esta tabla ha sido reproducida de “Biomass Combustion in Fluidized Bed Boilers: Potential Problems and Remedies” por Khan et al., 2009.

Composición de la Biomasa

En todos sus tipos la biomasa se encuentra formada por lignina, celulosa y hemicelulosa en diferentes proporciones.

Celulosa. La celulosa es un polímero natural presente en muchos vegetales que se encuentra en forma de un polisacárido insoluble con un grado de polimerización de alrededor de 10.000 (Galiwango et al., 2019). De acuerdo a Kumar (2017, como se citó en Galiwango et al., 2019) de manera general los polisacáridos presentes en la celulosa se encuentran constituidos por cadenas lineales de unidades repetitivas de glucopiranosas unidas por enlaces glucosídicos β -1,4 y tiene una fórmula general de $(C_6H_{10}O_5)_n$, donde n representa el número de unidades de glucopiranosas β -d monoméricas repetidas y varía según la fuente de la celulosa. En ese mismo sentido la celulosa es el principal constituyente de la pared celular de una planta, ofreciendo protección, soporte estructural y actuando como elemento de refuerzo junto con la hemicelulosa y la lignina.

El potencial uso de la celulosa se establece en base a la disponibilidad existente en muchos organismos como hongos, algas y bacterias, a lo cual se añade su bajo costo, esto lo coloca como un polímero natural que promete ser un suministro sostenible de materias primas. En igual forma, la celulosa también tiene las ventajas de ser biodegradable, duradera, no tóxica y térmica y mecánicamente estable. (Galiwango et al., 2019)

Hemicelulosa. La hemicelulosa es un polímero natural heteropolisacárido que se encuentra asociado a la celulosa. Posee una estructura amorfa y ramificada, compuesto por unidades repetitivas de monosacáridos, como glucosa, xilosa, arabinosa y manosa (Mansor et al., 2019). Es inestable y se degrada fácilmente con ácidos y bases, lo que dificulta su extracción a partir de la biomasa. Posee un bajo grado de polimerización y cristalinidad en comparación con la celulosa. Mansor et al. (2019) mencionan en su investigación que los productos de la pirólisis de hemicelulosa son principalmente ácidos, furanos, cetonas, aldehídos y anhidroazúcares ya que su estructura está compuesta principalmente de xilano.

Lignina. La lignina es un polímero natural de fenilo que consta de tres unidades básicas (p-hidroxifenilo, guayacilo y siringilo) que en procesos térmicos se descompone en gases no condensables y derivados del fenol (Cheng et al., 2020). Cuando se somete a procesos de pirólisis la lignina produce principalmente alcoholes, derivados acéticos y fenólicos, la mayoría de los cuales contribuyen a la formación de líquido de pirólisis con mayor peso molecular, mayor viscosidad, pero menor contenido de agua (Mansor et al., 2019). En la investigación desarrollada por Mansor et al. (2019) mencionan que la descomposición primaria de la lignina ocurre en un amplio rango de temperatura (200 - 800 °C) además de que la tasa de reacción de pirólisis de la lignina es menor en comparación con la celulosa y la hemicelulosa debido a las estructuras más complejas y térmicamente estables de la lignina. Los monómeros fenólicos son propensos a volver a oligomerizarse en asfalto más pesado o incluso carbonizarse en presencia de ácido acético. (Cheng et al., 2020)

En la Tabla 3 se detalla la composición de algunas fuentes de biomasa con potencial actividad agrícola en el Ecuador y la variabilidad en cuanto al contenido de lignina celulosa y hemicelulosa que presentan.

Tabla 3

Composición de Lignina, celulosa y hemicelulosa de algunas fuentes de Biomasa en el Ecuador

Fuentes de Biomasa	Lignina, %	Celulosa, %	Hemicelulosa, %
Bagazo de Caña	7.1	39.8	39.5
Cáscaras de Cacao	1.89	53.1	28
Cáscaras de Café	9.1	49.8	41.2
Residuos de Palma Africana	18.6	39.1	42.3
Raquis de Banano	21.7	51.2	27.1

Nota. Esta tabla ha sido reproducida de “Determinación de la capacidad calorífica de biomásas residuales de la producción agrícola del Ecuador” por Flores Guamán, 2022.

Gas de Síntesis

Santos & Alencar (2020) definen al gas de síntesis como una mezcla gaseosa en diferentes proporciones de hidrógeno (H₂) y monóxido de carbono (CO) que sirve como materia prima para la obtención de combustibles y derivados petroquímicos. El gas de síntesis se obtiene por procesos de gasificación de carbón, gas natural, aceites residuales y el petróleo. Sin embargo, en la actualidad se obtiene a través de fuentes de biomasa. En ese contexto se establece que las fuentes más comunes para la producción de gas de síntesis son los materiales lignocelulósicos derivados de actividades agrícolas y agroforestales debido a su alta conversión térmica en hidrógeno y monóxido de carbono. (Santos & Alencar, 2020)

Diseño del Proceso

El diseño de un proceso nace de la necesidad que se puede percibir de una problemática de interés público, de una oportunidad comercial o de algún estudio realizado por el área ventas y marketing de una organización. En efecto, al identificar la necesidad se define claramente el objetivo general del proyecto, los requerimientos de las distintas unidades de proceso y las condiciones de operación de cada bloque de trabajo. De esta manera, se puede iniciar con la construcción del diseño base del proceso que consta de las especificaciones del producto de interés (pureza) junto con la información de la tasa de producción del proceso en general. (Towler & Sinnott, 2021)

Etapas del diseño del Proceso

Establecer la Base del Diseño. En esta etapa se traduce la necesidad del cliente en declaración más precisa del problema a resolver. De manera general se incluyen variables iniciales de diseño que incluyen la tasa de producción y las especificaciones de pureza del producto principal (Towler & Sinnott, 2021). De la misma manera la base de diseño debe contar con la información detallada de las limitaciones que influirán en el diseño, como:

1. El número de unidades a utilizar en el proceso.
2. Las normas nacionales, locales o de la empresa que deben seguirse.
3. Características de las materias primas disponibles.
4. Detalles técnicos (clima, condiciones sísmicas, infraestructura, etc.) de la zona donde podría ubicarse la planta.

5. Información de los servicios públicos de la zona de ubicación de la planta, que incluyen condiciones, disponibilidad y precio de los servicios públicos que se necesitarán para ejecutar el proceso.

Etapa del Concepto del Diseño. En esta etapa se define el producto y se construye el caso de negocios a partir de una evaluación de mercado. Se determinan los requisitos del cliente y los requisitos del producto para crear conceptos de productos y realizar una evaluación de oportunidades. (Harmsen et al., 2018)

Etapa de Factibilidad del Diseño. En la etapa de factibilidad se comparan los conceptos superiores generados durante la etapa de concepto con los requisitos del cliente para definir el caso comercial del diseño. Se realiza una evaluación del mercado actualizada y se analiza la competencia. Para el caso de productos químicos básicos se plantea la generación de un diagrama de flujo y se abordan temas con respecto a la generación de prototipos de productos con su respectiva evaluación por parte de los clientes para el rediseño de conceptos planteados en la primera etapa. El equipo prepara una propuesta comercial completa, junto con su recomendación. En esta puerta, el equipo de gestión decide si invertir más o abandonar el proyecto. La validación de la viabilidad de los conceptos superiores comienza con la construcción de prototipos de productos (Harmsen et al., 2018).

Etapa de Desarrollo del Diseño. La etapa de desarrollo tiene como propósito la creación del producto, asegurando que sea fabricable y de acuerdo a la necesidad del cliente. En efecto, en esta etapa de ser necesario se dimensionan y optimizan los equipos. En resumen, se abordan temas, con respecto a las especificaciones del producto, la evaluación de la viabilidad de fabricación y el diseño detallado del proceso, especialmente para los productos químicos básicos. (Harmsen et al., 2018)

Síntesis del Proceso

El diseño del proceso implica la producción de productos químicos confiables, seguros y económicos, mediante operaciones de proceso que se configuran en diagramas de flujo, que se construyen a partir de la experiencia adquirida en procesos similares, con métodos de análisis de árboles de decisión y programación matemática. De esta manera, se decide sobre el estado de las materias primas, productos y las operaciones unitarias requeridas para el proceso. (Harmsen et al., 2018)

Pasos para la síntesis de Procesos.

La síntesis de procesos implica la selección de unidades de procesamiento para convertir las materias primas en productos, los mismos que se encuentran establecidos en un diagrama de flujo. Es común observar que cuando se inserta una operación de reacción, la corriente que sale a menudo tiene los productos deseados. Sin embargo, la composición, temperatura, presión y fase requeridas no son las deseadas. Para eliminar las diferencias restantes, se necesitan operaciones unitarias de separación, seguidas de operaciones para cambiar la temperatura, la presión y la fase. (Harmsen et al., 2018)

En la Tabla 4 se detalla los pasos para la síntesis de procesos y las operaciones que se recomiendan utilizar.

Tabla 4

Pasos en la Síntesis de Procesos

Pasos	Operaciones de Proceso
1. Eliminar las diferencias en los tipos moleculares.	Reacciones químicas
2. Distribuir los productos químicos haciendo coincidir las fuentes y los sumideros.	Mezcla
3. Eliminar las diferencias en la composición	Separación
4. Eliminar las diferencias de temperatura, presión y fase.	Temperatura, presión y cambio de fase
5. Integrar tareas; es decir, combinar operaciones en unidades procesos.	

Nota. Esta tabla ha sido reproducida de “Product and Process Design Principles: Synthesis, Analysis and Design” por Seider et al., 2018.

Diagramas de Flujo

Los diagramas de flujo constituyen un elemento importante del diseño del caso base, que permiten compartir información del proceso. Los tres tipos principales de diagramas de

flujo son el diagrama de flujo de bloques más simple (BFD), el diagrama de flujo de proceso (PFD) y el diagrama de tubería e instrumentación (P&ID). (Seider et al., 2018)

Diagramas de Flujo de Bloques (BFD). El diagrama de flujo de bloques representa las principales unidades de procesamiento en términos de bloques funcionales con la información general de cada unidad. (Seider et al., 2018)

Diagramas de Flujo de Proceso (PFD). Los diagramas de flujo del proceso proporcionan información detallada de cada unidad operacional que pueden incluir intercambiadores de calor, bombas y compresores. Así mismo, brindan información sobre la corriente e incluyen los principales lazos de control que permiten regular el proceso en condiciones normales de funcionamiento. (Seider et al., 2018)

Al finalizar la construcción del diagrama de flujo del proceso (PFD), se puede verificar el diseño del proceso y obtener la información adicional necesaria para comenzar a trabajar en el diseño detallado. Seider et al. (2018) mencionan que tres actividades constituyen el diseño final, la primera es crear una base de datos detallada para iniciar con la construcción de una planta piloto. La segunda actividad consiste en verificar que los elementos del equipo funcionan correctamente y proporcionar datos para el banco de datos detallado y la tercera actividad consiste en preparar un modelo de simulación para proyectar el impacto de los cambios en el diseño y la operación modificando parámetros tales como temperaturas, presiones, relaciones de reflujo y el número de etapas.

Capítulo III

Metodología

Descripción general del proceso.

Corrientes de Alimentación del Proceso.

Como alimentación en el proceso de simulación se especifican flujos másicos de dos fuentes diferentes de Biomasa y residuos de Polietilenos que se utilizan en el proceso de pirólisis.

Propiedades Termodinámicas de la Biomasa. Para realizar la simulación del proceso de pirólisis se realizó una búsqueda bibliográfica de las propiedades termodinámicas de la Biomasa. Para lo cual, se tomó en cuenta los residuos fibrosos de la Palma Africana del trabajo realizado por Vergaria (2022) y del bagazo de caña de azúcar del estudio realizado por Quinteros Vaca (2020), debido a que representan el mayor volumen de desechos generados de biomasa por las actividades industriales en el Ecuador.

Las propiedades termodinámicas de los residuos fibrosos de la palma africana se describen en la Tabla 5 y permiten definir la alimentación de Biomasa en la simulación del proceso.

Tabla 5

Propiedades termodinámicas de los residuos fibrosos de la Palma Africana

PARÁMETRO	PROPIEDAD	VALOR
Análisis Aproximado (PROXANAL)	Humedad Total % (Moisture)	37
	Cenizas % (Ash)	5.5
	Volátiles % (VM)	53.14
	Carbono Fijo % (FC)	12.56
Análisis Final (ULTANAL)	Cenizas %	5.5
	Carbono, C %	58.9
	Hidrógeno, H %	20.15
	Nitrógeno, N %	4.21
	Oxígeno, O %	8.62
Análisis de Azufre (SULFANAL)	Azufre, S %	0.24
	Pirólítico	0
	Orgánico	0.24
	Sulfato	0

Nota. Esta tabla ha sido reproducida de “Caracterización física y energética del residuo fibroso proveniente del procesamiento de la palma africana variando el porcentaje de humedad para aprovechamiento bioenergético en la empresa Quevepalma” por Vergara, 2022.

En cuanto a las propiedades termodinámicas del bagazo de caña de azúcar se detallan en la Tabla 6 y permiten definir la alimentación de Biomasa en la simulación del proceso.

Tabla 6*Propiedades termodinámicas del bagazo de Caña de Azúcar*

PARÁMETRO	PROPIEDAD	VALOR
Análisis Aproximado (PROXANAL)	Humedad Total % (Moisture)	5.2
	Cenizas % (Ash)	7.74
	Volátiles % (VM)	78.62
	Carbono Fijo % (FC)	14.57
Análisis Final (ULTANAL)	Cenizas %	7.74
	Carbono, C %	44.39
	Hidrógeno, H %	8.85
	Nitrógeno, N %	0.23
	Oxígeno, O %	46.30
Análisis de Azufre (SULFANAL)	Azufre, S %	0.23
	Pirolítico	0
	Orgánico	0.23
	Sulfato	0

Nota. Esta tabla ha sido reproducida de “Caracterización del bagazo de caña de azúcar de variedades del Ingenio Azucarero Tababuela para bioenergía” por Quinteros, 2020.

Propiedades Termodinámicas de los residuos de Polietilenos. En la Tabla 7 se muestran las propiedades termodinámicas de los residuos de Polietilenos. El tipo de polietileno utilizado es el de baja densidad (LDPE) y los datos fueron obtenidos del trabajo realizado por Zheng et al. (2018) y que se utilizaron para definir la corriente de alimentación de PE.

Tabla 7

Propiedades termodinámicas no convencionales del LDPE

PARÁMETRO	PROPIEDAD	VALOR
Análisis Aproximado (PROXANAL)	Humedad Total % (Moisture)	0
	Cenizas % (Ash)	0.92
	Volátiles % (VM)	99.08
	Carbono Fijo % (FC)	0
Análisis Final (ULTANAL)	Cenizas %	0.92
	Carbono, C %	85.43
	Hidrógeno, H %	13.58
	Nitrógeno, N %	0
	Oxígeno, O %	0
Análisis de Azufre (SULFANAL)	Azufre, S %	0.07
	Pirolítico	0
	Orgánico	0
	Sulfato	0.074

Nota. Esta tabla ha sido reproducida de “Study of the thermal behavior, kinetics, and product characterization of biomass and low-density polyethylene co-pyrolysis by thermogravimetric analysis and pyrolysis-GC/MS” por Zheng et al., 2018.

Obtención de Gas de Síntesis

Para la obtención de gas de síntesis mediante la pirólisis de biomasa y residuos plásticos se realizó una búsqueda bibliográfica de las propiedades termodinámicas de las corrientes de alimentación requeridos por el software de simulación. Utilizando como fuentes de información estudios de caracterización de Biomasa realizados en Ecuador. El proceso general se dividió en dos segmentos de reacción siendo el primero la gasificación de polietileno y el segundo la pirólisis de la biomasa. Para especificar las características del polietileno se utilizó el polietileno de baja densidad (LDPE) que según se reporta en la bibliografía en el desecho plástico de polietileno con mayor volumen en el Ecuador, con un valor aproximado de 342 950,95 kilogramos (Solíz & Morán, 2021). Los productos resultantes de cada uno de los subprocesos se integraron en un sistema de reacción final de gasificación, con el objetivo de incrementar el rendimiento de gas de síntesis. Las condiciones de operación de los sistemas de reacción se basaron en estudios reportados en la literatura que mediante análisis de sensibilidad usando el software de simulación se utilizaron para incrementar el rendimiento de gas de síntesis.

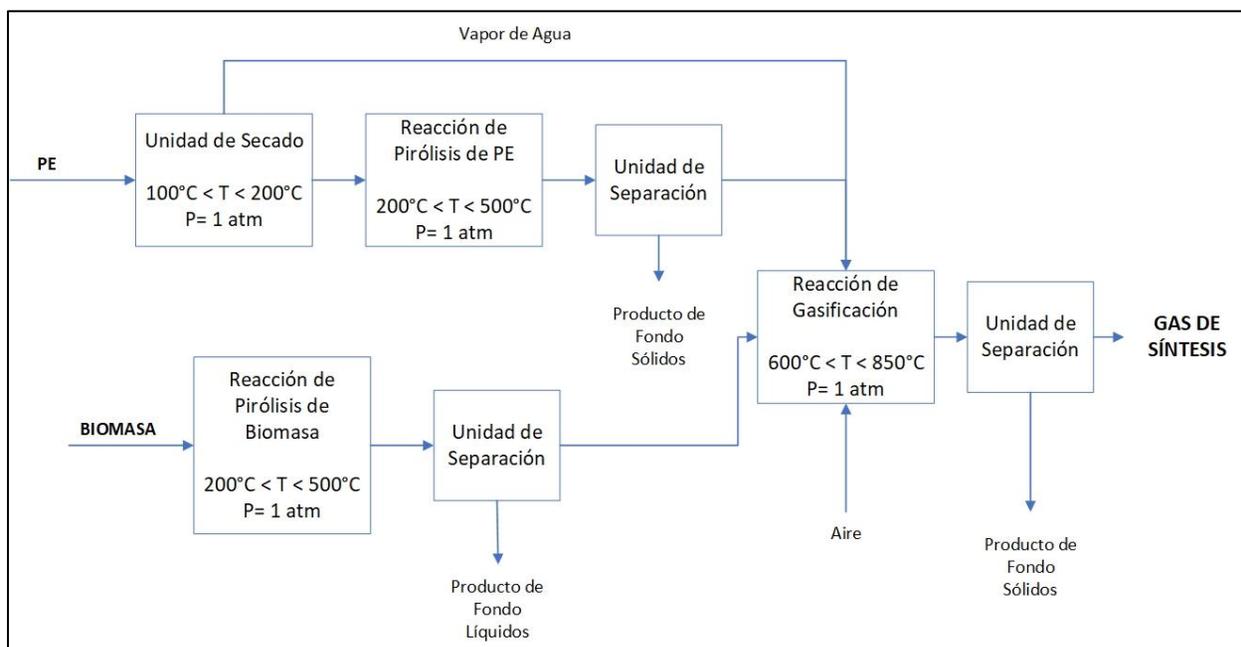
Diagramas de Flujo de Procesos

Diagramas de Flujo de Bloques (BFD)

La Figura 3 muestra las principales secciones del proceso que incluyen las entradas, salidas y de las operaciones involucradas en la pirólisis de biomasa y polietileno de baja densidad (HDPE) mediante un diagrama de flujo de bloques.

Figura 3

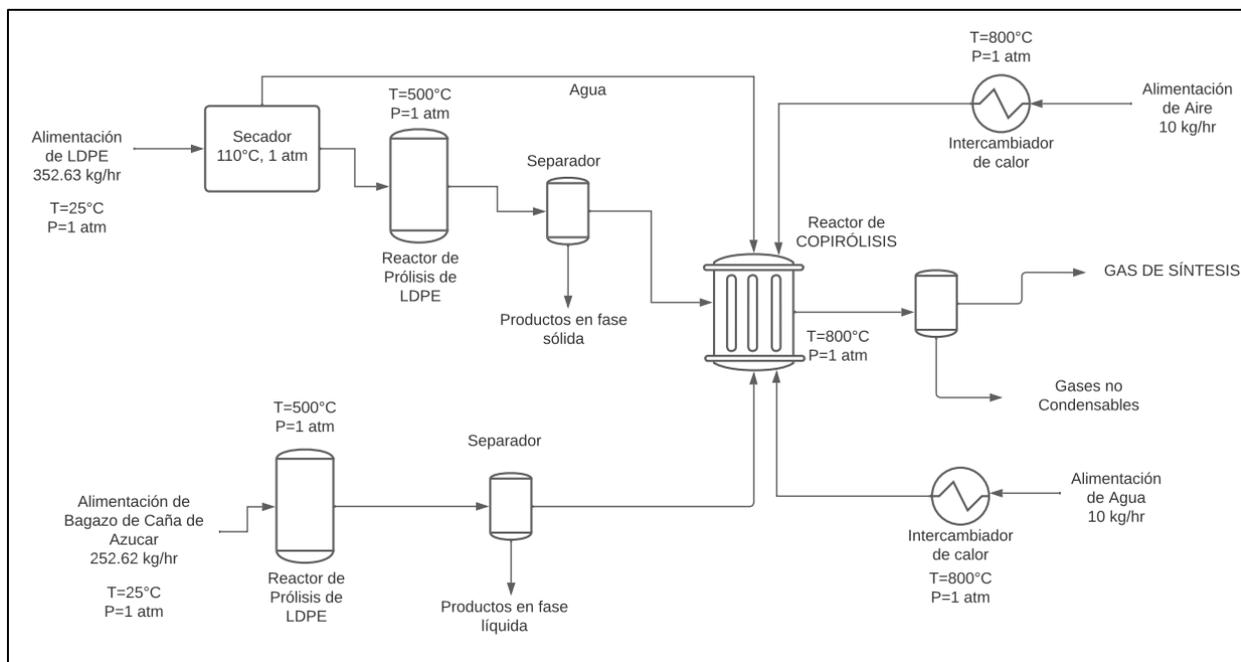
Diagrama de bloque (BFD) del proceso de pirólisis



Diagramas de Flujo de Proceso (PFD)

Figura 4

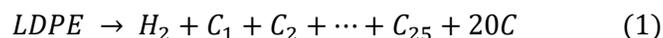
Diagrama de Flujo de Procesos (PFD) del proceso de Copirólisis



Reacciones Químicas del Proceso

Reacción de Pirólisis de Polietileno de baja densidad (LDPE).

Los componentes establecidos como productos para la reacción química de pirólisis de polietileno, se seleccionaron de acuerdo a la investigación propuesta por Adeniyi et al. (2018) como se muestran a continuación.



Según Adeniyi et al. (2018) la cinética de las reacciones de pirólisis ajustada para el LDPE según la ecuación de Arrhenius se da a una velocidad de calentamiento de 5 K/min. Los valores reportados son $A = 3.367E17 \text{ s}^{-1}$ y $E = 279.74 \text{ KJ/mol}$. En la Tabla 8 se pueden observar la composición de sólidos, líquidos y gases para la pirólisis de LDPE ajustado a los parámetros cinéticos propuesto por Adeniyi et al. (2018).

Tabla 8*Distribución de Productos de Pirólisis de LDPE*

Productos de Pirólisis	Porcentaje en peso, %
Aceite de Pirólisis	92.88
Carbono elemental	4.9
Gas de Síntesis	2.22

Nota. Esta tabla ha sido reproducida de “Computer aided modelling of low density polyethylene pyrolysis to produce synthetic fuels” por (Adeniyi et al., 2018).

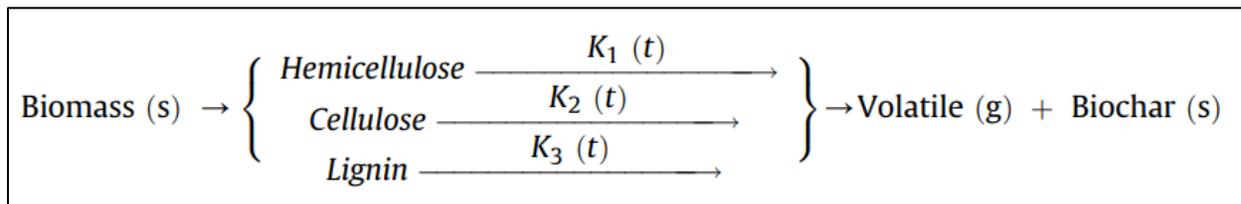
En este trabajo el reactor de pirólisis se simuló utilizando un modelo (R-Yield) que simula el proceso de reacción en base al rendimiento de los productos requeridos y no en la estequiometría de la reacción. Se evaluó la influencia del contenido de carbono, hidrógeno y cenizas del polietileno de baja densidad y la relación de equivalencia en la obtención de H₂ y carbono elemental (C).

Reacciones de Pirólisis de Biomasa.

Debido a la complejidad asociada de la gran variedad de reacciones en serie y en paralelo en el modelado de la cinética de pirólisis de biomasa no se puede asumir que la reacción se establece en un solo paso. Para establecer un mecanismo de reacción se plantea un esquema de tres reacciones paralelas independientes que se basan en el contenido de celulosa, lignina y hemicelulosa presentes en la mayoría de fuente de Biomasa como se muestra en la Figura 5. (Siddiqi et al., 2020)

Figura 5

Mecanismo de Reacción de la Biomasa.



Nota. El gráfico representa el mecanismo de reacción de la Biomasa en general. Tomado de *A synergistic study of reaction kinetics and heat transfer with multi-component modelling approach for the pyrolysis of biomass waste* (p. 3) por Siddiqi et al., 2020, Energy.

En este trabajo se simuló la pirólisis de la biomasa utilizando el bloque R-Stoic asumiendo que la biomasa se descompuso en componentes más simples. El componente no convencional ingresado en la corriente de entrada se convirtió a los componentes convencionales (C, H₂, CO, CH₄, CO₂, H₂O, H₂S, N₂, NH₃).

Reacciones de Gasificación.

Para el sistema de gasificación de polietileno de baja densidad y la fuente de biomasa utilizada se establecieron las reacciones observadas en la Tabla 9, que fueron introducidos en el módulo RGIBBS del software de simulación.

Tabla 9

Reacciones de Gasificación para la obtención de Gas de Síntesis

No.	Reacciones de Gasificación	Calor de Reacción (kJ/mol) T=1000K	Tipo
1	$C + \frac{1}{2}O_2 \leftrightarrow CO$	-112	Reacciones con oxígeno
2	$CO + \frac{1}{2}O_2 \leftrightarrow CO_2$	-283	
3	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \leftrightarrow H_2O$	-248	
4	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	136	Reacciones con Agua
5	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	-35	
6	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$	206	
7	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$	171	Reacción de Boudouard
8	$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$	-74.8	Reacciones de Metanación
9	$CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$	-225	
10	$CO_2 + 4H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$	-190	

Nota. Esta tabla ha sido reproducida de "Gasification for Practical Applications" por Yun, 2012.

Simulación.

Selección del modelo termodinámico.

El modelo termodinámico elegido es "Peng-Robinson", ya que toma en cuenta los grupos moleculares referidos a Biomasa y polietileno de baja densidad presentes en los sistemas de reacción. Este modelo se ajusta al estado estacionario del proceso y grupos moleculares no

convencionales, ingresados como alimentaciones de las unidades de reacción. Así mismo, es un modelo que se ajusta los trabajos experimentales de pirólisis reportados en la literatura. (Hantoko et al., 2019)

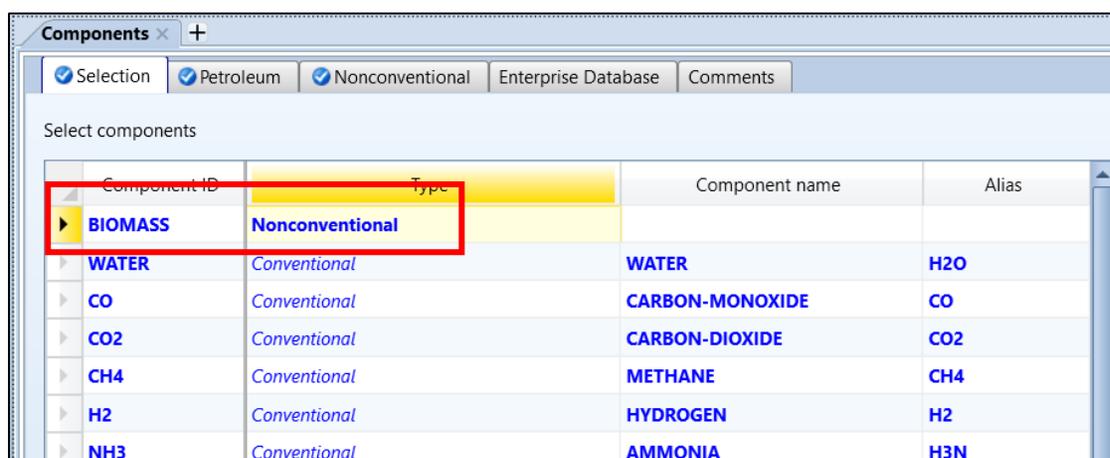
Ingreso de componentes no convencionales en el Software de Simulación.

Generalmente los simuladores de procesos químicos contienen una base de datos establecida para componentes puros, sin embargo, existen casos donde los componentes necesarios en la simulación deben ser ingresados según sus propiedades termodinámicas, como componentes no convencionales (NC).

Para establecer el componente se escribe el nombre deseado y se ajusta como un componente no convencional como se muestra en la Figura 6.

Figura 6

Ventana de Selección de componentes

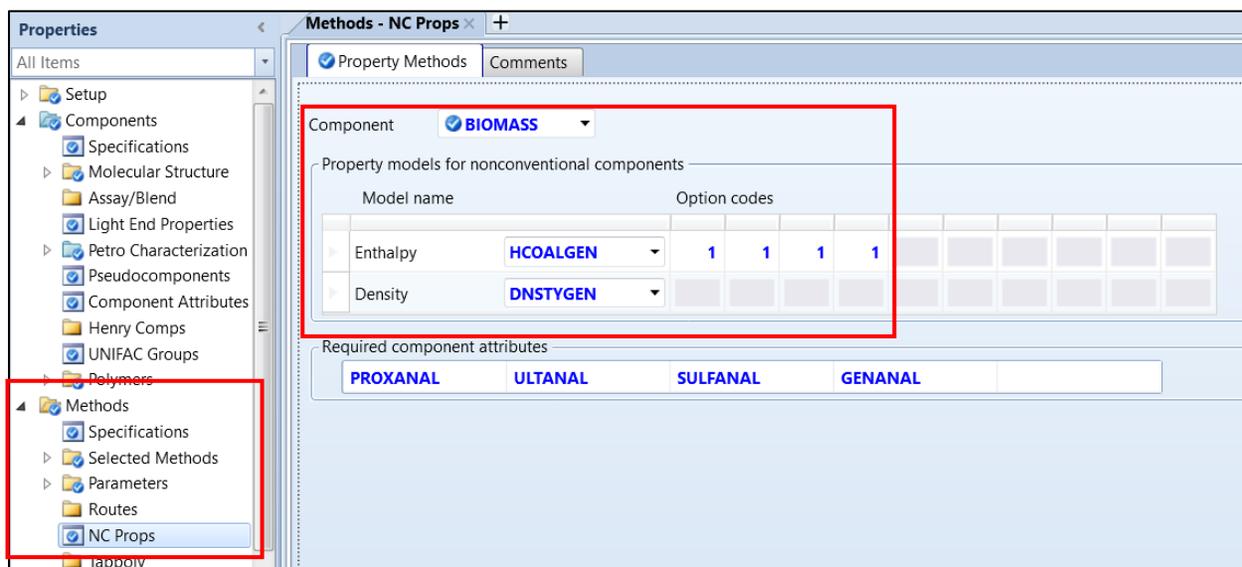


Para ingresar las propiedades termodinámicas de los componentes no convencionales debemos ir a la pestaña *Methods* y dar clic en *NC Pops*. A continuación, se eligen los modelos

de entalpia (*HCOALGEN*) y densidad (*DNSTYGEN*) correspondientes. La Figura 7 muestra los pasos que se deben seguir para completar la definición de los componentes no convencionales.

Figura 7

Ingreso de propiedades no convencionales de los componentes.



Las propiedades termodinámicas no convencionales se describen en la Tabla 5 y en la Tabla 6 para el caso de la palma africana y caña de azúcar. Mientras que para los residuos de polietileno de baja densidad se describen en la tabla Tabla 7.

Simulación del reactor de pirólisis de Biomasa.

Se pretende utilizar el modelo de reactor *RStoic* proporcionado por el simulador de procesos químicos. Este modelo utiliza la estequiometría de reacción cuando la información de la cinética de la reacción es limitada. Dicho modelo puede tener varias corrientes de alimentación, sin embargo, solo tiene una corriente de salida de productos.

La corriente de entrada a utilizar en el reactor de pirólisis RStoic corresponde al flujo de biomasa de la palma africana o de la caña de azúcar con sus respectivas relaciones estequiométricas. Para la simulación del reactor se requiere la temperatura y presión de reacción, así como las reacciones químicas que se dan dentro del sistema. Todas estas especificaciones se muestran en la Tabla 10 junto con la corriente que se evidencia en la Figura 8 y las reacciones químicas en la Figura 9.

Figura 8

Corriente de alimentación de Biomasa al reactor de Pirólisis (PIROBIO).

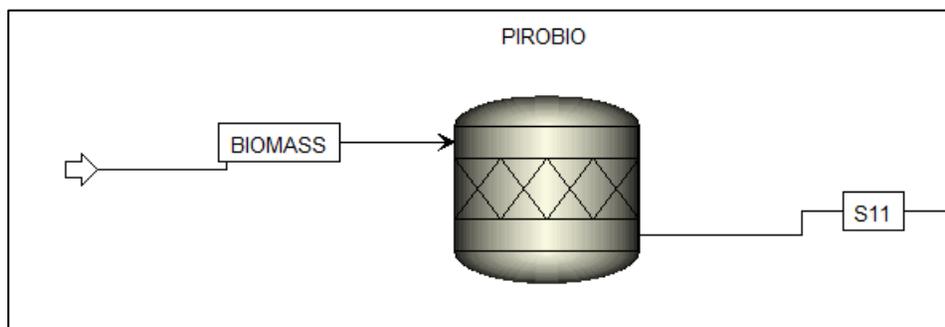


Tabla 10

Datos ingresados al reactor de Pirólisis (PIROBIO)

Corriente	Flujo másico, kg/h	Presión, atm	Temperatura, °C
Biomass	10	1	25
Equipo	Modelo	Presión, atm	Temperatura, °C
Reactor (PIROBIO)	RStoic	1	500

Figura 9

Ventana de reacciones definidas en el reactor de Pirólisis (PIROBIO).

Rxn No.	Specification type	Molar extent	Units	Fractional conversion	Fractional Conversion of Component	Stoichiometry
1	Frac. conversion		kmol/hr	0,0525	BIOMASS	BIOMASS --> 0,006897 OIL(MIXED)
2	Frac. conversion		kmol/hr	0,187	BIOMASS	BIOMASS --> 0,035702 CO(MIXED)
3	Frac. conversion		kmol/hr	0,2117	BIOMASS	BIOMASS --> 0,022723 CO2(MIXED)
4	Frac. conversion		kmol/hr	0,1192	BIOMASS	BIOMASS --> 0,062332 CH4(MIXED)
5	Frac. conversion		kmol/hr	0,0103	BIOMASS	BIOMASS --> 0,496032 H2(MIXED)
6	Frac. conversion		kmol/hr	0,0002	BIOMASS	BIOMASS --> 0,058717 NH3(MIXED)
7	Frac. conversion		kmol/hr	0,003	BIOMASS	BIOMASS --> 0,029346 H2S(MIXED)
8	Frac. conversion		kmol/hr	0,0049	BIOMASS	BIOMASS --> 0,035697 N2(MIXED)
9	Frac. conversion		kmol/hr	0,4112	BIOMASS	BIOMASS --> 0,055509 WATER(MIXED)

Reactions occur in series

Simulación del reactor de pirólisis de LDPE.

Para la simulación de pirólisis de LDPE se pretende utilizar el modelo de reactor *RYield* proporcionado por el simulador de procesos químicos que realiza los cálculos basados en el rendimiento. Antes de ingresar al reactor de pirólisis (*PIROPE*) el LDPE pasa por un proceso de secado que se simulará con un reactor *RStoic* con el objetivo de eliminar la humedad contenida y obtener una fase sólida que ingresará al sistema de reacción denominado *PIROPE* como se muestra en la Figura 10. Las especificaciones de presión y temperatura de secado y reacción de pirólisis se muestran en la tabla Tabla 11 junto a los datos de alimentación de LDPE.

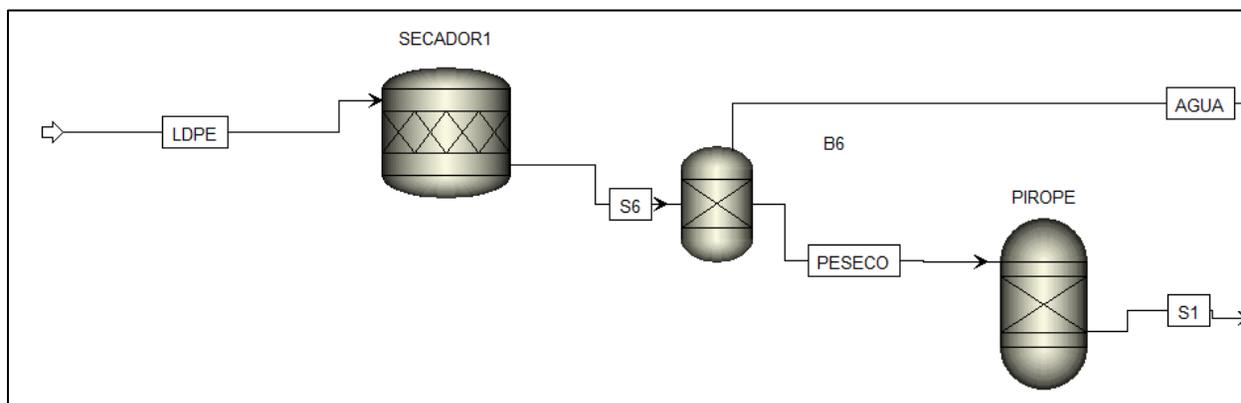
Tabla 11

Datos ingresados al Secador y Reactor de Pirólisis de LDPE

Corriente	Flujo másico, kg/h	Presión, atm	Temperatura, °C
LDPE	100	1	25
Equipo	Modelo	Presión, atm	Temperatura, °C
SECADOR1	RStoic	1	110
PIROPE	RYield	1	500

Figura 10

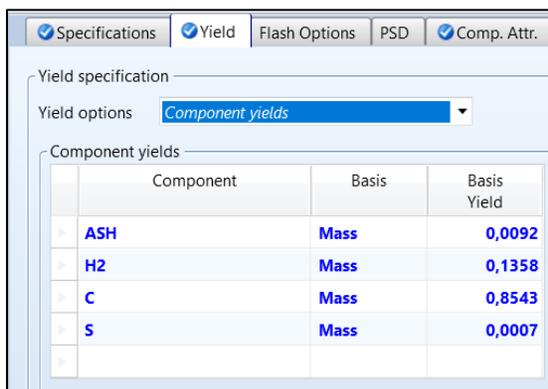
Sistema de Secado y Reacción de Pirólisis de LDPE



Las reacciones establecidas según el rendimiento de reacción para el reactor PIROPE se muestran en la Figura 11.

Figura 11

Ventana de reacciones definidas en el Reactor de LDPE (PIROPE)



Component	Basis	Basis Yield
ASH	Mass	0,0092
H2	Mass	0,1358
C	Mass	0,8543
S	Mass	0,0007

Simulación del reactor de copirólisis de LDPE junto con Biomasa.

Para llevar a cabo la simulación del proceso de copirólisis se pretende utilizar el modelo de reacción *RGibbs* que se basa en la minimización de la energía libre de Gibbs utilizando las reacciones químicas de gasificación que se detallan en la Tabla 9. Para definir las reacciones químicas en el modelo *RGibbs* se debe especificar el método de cálculo, dando clic en la pestaña *Calculation Option* y estableciendo el parámetro *Restrict chemical equilibrium – specify temperature approach or reactions* como se muestra en la Figura 12.

Figura 12

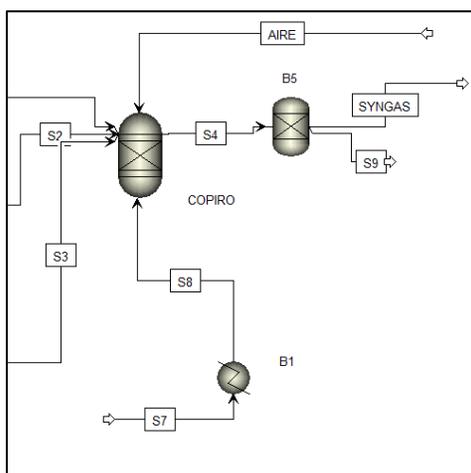
Definición del parámetro de cálculo en el reactor de Copirólisis



Generalmente las reacciones de gasificación incluyen la presencia de O₂ y Agua para formar el gas de síntesis. En este proceso se pretende incluir corrientes de Aire y de Agua (S7) para aumentar el rendimiento de la reacción en el reactor de copirólisis (COPIRO) modificando su flujo, junto con las corrientes de productos de la pirólisis de LDPE y Biomasa como se muestra en la figura Figura 13.

Figura 13

Corrientes de entrada de O₂ y Aire en el reactor de Copirólisis (COPIRO)



Las condiciones de operación para el reactor de copirólisis (COPIRO) se detallan en la Tabla 12 junto con las reacciones definidas que se muestran en la Figura 14.

Tabla 12

Condiciones de Operación del reactor de Copirólisis

Equipo	Modelo	Presión, atm	Temperatura, °C
COPIRO	RGibbs	1	800

Figura 14

Ventana de Reacciones de Gasificación definidas en el reactor de Copirólisis (COPIRO)

Rxn No.	Specification type	Stoichiometry
1	Temp. approach	$\text{H}_2 + 0,5 \text{O}_2 \rightarrow \text{WATER}$
2	Temp. approach	$\text{CH}_4 + \text{WATER} \rightarrow \text{CO} + 3 \text{H}_2$
3	Temp. approach	$\text{CO} + 0,5 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$
4	Temp. approach	$\text{CO} + \text{WATER} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$
5	Temp. approach	$\text{CO} + 3 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{WATER}$
6	Temp. approach	$\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{WATER}$
7	Temp. approach	$\text{C} + 0,5 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}$
8	Temp. approach	$\text{C} + \text{WATER} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$
9	Temp. approach	$\text{C} + \text{CO}_2 \rightarrow 2 \text{CO}$
10	Temp. approach	$\text{C} + 2 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4$

Simulación de separadores.

Para la separación de componentes en cada uno de los sistemas de reacción se utilizó el modelo *Sep* en el cual se especifican las fracciones de separación en un intervalo comprendido entre 0 y 1. En este trabajo se pretende separar completamente los productos de interés en cada sistema de reacción, para lo cual se estableció el valor de uno en cada sistema como se puede verificar en la Figura 15 y Figura 16.

Figura 15

Ventana de separación del efluente del reactor de Pirólisis de LDPE

Specifications | Feed Flash | Outlet Flash | Utility | Comments

Outlet stream conditions
 Outlet stream: S2
 Substream: MIXED

Component ID	Specification	Basis	Value	Units
WATER	Split fraction			
CO	Split fraction			
CO2	Split fraction			
CH4	Split fraction		1	
H2	Split fraction		1	
NH3	Split fraction			
H2S	Split fraction			
N2	Split fraction			
OIL	Split fraction			
O2	Split fraction			
C2H6	Split fraction			
C3H8	Split fraction			

Figura 16

Ventana de separación del efluente del reactor de Pirólisis de Biomasa.

Specifications | Feed Flash | Outlet Flash | Utility | Comments

Outlet stream conditions
 Outlet stream: S3
 Substream: MIXED

Component ID	Specification	Basis	Value	Units
WATER	Split fraction		1	
CO	Split fraction		1	
CO2	Split fraction		1	
CH4	Split fraction		1	
H2	Split fraction		1	
NH3	Split fraction			
H2S	Split fraction			
N2	Split fraction			
OIL	Split fraction			
O2	Split fraction			
C2H6	Split fraction			
C3H8	Split fraction			

Capítulo IV

Resultados y Discusiones

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos con respecto a la simulación en el software Aspen Plus V10. del proceso de pirólisis de Biomasa con polietileno de baja densidad LDPE para la obtención de gas de síntesis.

Fuente de Biomasa del Proceso.

En la tabla Tabla 13 se observa flujo másico de gas de síntesis obtenido a partir de los desechos de bagazo de caña de azúcar definido como componente no convencional con los valores de la Tabla 6 y de los residuos fibrosos de la palma africana definido con sus propiedades no convencionales reportados en la Tabla 5. Se puede observar que el desecho de actividad agrícola óptimo para la producción de gas de síntesis se logra con el bagazo de la caña de azúcar.

Tabla 13

Flujo másico de Gas de Síntesis producto de la copirólisis de diferentes biomosas

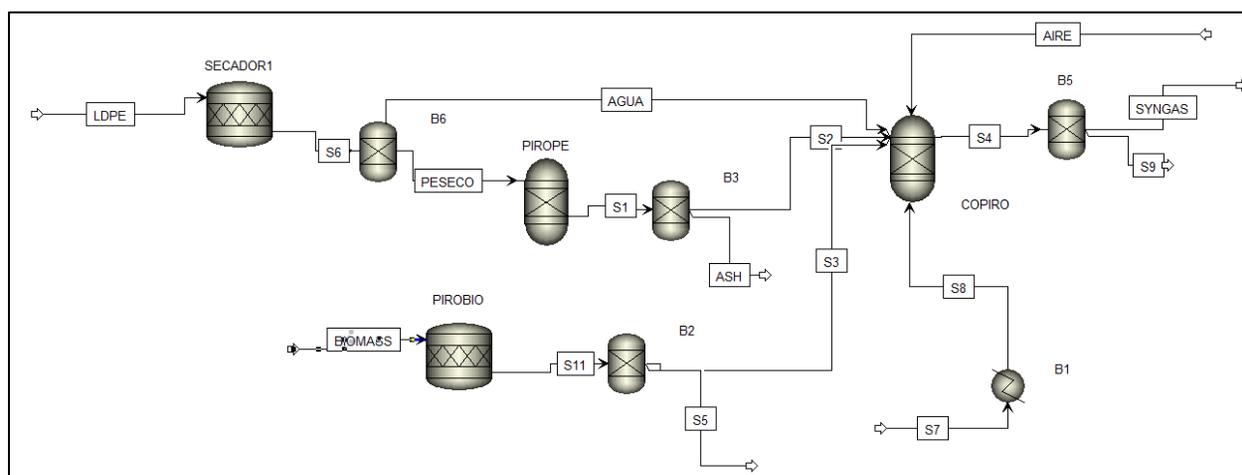
Fuente de Biomasa	Flujo másico de Gas de Síntesis, kg/hr
Bagazo de caña de azúcar	420.87
Fibras de palma africana	418.52

Proceso de obtención de gas de síntesis.

La Figura 17 ilustra la configuración diseñada en Aspen Plus V10 para el proceso de copirólisis de residuos de palma africana con polietileno de baja densidad. En este esquema se observan 3 pasos para la producción de gas de síntesis. El primer paso consiste en secar la alimentación de LDPE calentándolo a 110°C y 1 atm de presión que fluye al reactor de pirólisis en donde se produce una conversión térmica a 500 °C para obtener H₂, CH₄, carbono elemental (Yun, 2012). Así mismo se produce la pirólisis de Biomasa a una temperatura de 500°C con el objetivo de obtener más cantidad de H₂, CH₄, CO, O₂ y otros componentes que se utilizarán para maximizar el contenido de gas de síntesis. El segundo paso consiste en separar los productos de los efluentes de reacción para que se eliminen las impurezas y productos no deseados. Y finalmente se produce la copirólisis a una temperatura de 800°C y 5 atm de presión entre la biomasa y el LDPE para la obtención de gas de síntesis.

Figura 17

Proceso de obtención de Gas de síntesis mediante la copirólisis de LDPE y residuos de Caña de Azúcar



Balance de masa del proceso

Todas las corrientes del proceso simulado se ilustran en la Tabla 14, la corriente S4 corresponde a la corriente de salida del reactor de copirólisis. Así mismo en la corriente S1, nótese la cantidad de carbono elemental que resulta de la pirólisis de LDPE. La corriente S11 corresponde a los componentes a la salida de la pirólisis de la biomasa de Caña de Azúcar.

Tabla 14

Balance de masa

Componentes	Unidades	BIOMASS	LDPE	S11	S1	Aire	S8	S4
BIOMASS	kg/hr	252,62		78,1003				0
WATER	kg/hr			54,5434			100	57,41916
CO	kg/hr			44,7611				370,9297
CO2	kg/hr			41,1977				82,15912
CH4	kg/hr			18,285				52,04668
H2	kg/hr			1,39161	38,31			49,94011
NH3	kg/hr			0,02674				0,205325
H2S	kg/hr			0,40116				0
N2	kg/hr			0,65315		221,3		221,1376
OIL	kg/hr			13,2625				3,30E-31
LDPE	kg/hr		352,63					0
O2	kg/hr					67,2		2,55E-18
C	kg/hr				241			64,68826
ASH	kg/hr				2,5954			0
S	kg/hr				0,1975			0

Análisis de Sensibilidad.

La Figura 18 muestra el análisis de sensibilidad en la corriente S4 para determinar los flujos de que permita obtener una mayor cantidad de gas de síntesis. Así mismo, la Figura 19 muestra la curva de sensibilidad entre el flujo de LDPE en kg/h vs la composición de H2 a la salida del reactor de copirólisis, nótese que un aumento del flujo de LDPE permite tener una mayor composición de H2.

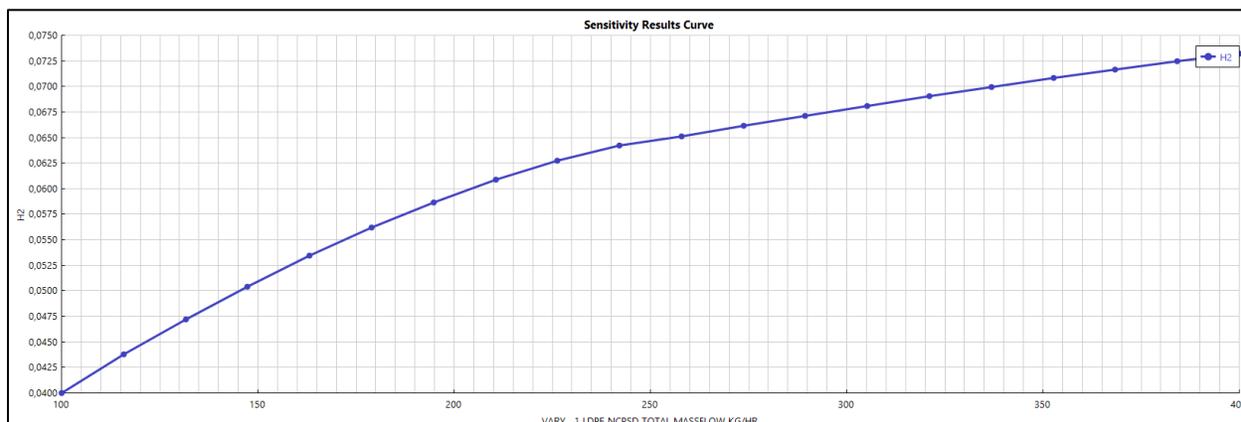
Figura 18

Resultados del Análisis de sensibilidad de flujos de corriente LDPE

Summary Define Variable Status				
Row/Case	Status	VARY 1 LDPE NCPD TOTAL MA SSFLOW KG/HR	F	
▶ 6	OK	178,947	0,0561646	
▶ 7	OK	194,737	0,0586618	
▶ 8	OK	210,526	0,0608782	
▶ 9	OK	226,316	0,0627546	
▶ 10	OK	242,105	0,0641956	
▶ 11	OK	257,895	0,0650832	
▶ 12	OK	273,684	0,0661313	
▶ 13	OK	289,474	0,0671396	
▶ 14	OK	305,263	0,0681102	
▶ 15	OK	321,053	0,0690453	
▶ 16	OK	336,842	0,0699468	
▶ 17	OK	352,632	0,0708164	

Figura 19

Curva de sensibilidad de flujo de LDPE vs Composición de H2 en la corriente S4



Con respecto al flujo de biomasa de caña de azúcar el análisis de sensibilidad se realizó en la corriente S4 como se ilustra en la Figura 20, nótese que la composición de H2 disminuye al variar el flujo de Biomasa como se evidencia en la Figura 21. Para establecer el flujo de biomasa se realizó un ensayo y error de la simulación determinándose el flujo correcto de biomasa que se detalla en la Tabla 15.

Tabla 15

Flujo másico de Biomasa de Caña de Azúcar resultado del análisis de sensibilidad

Corriente	Flujo másico, kg/hr	Composición de H2, %masa
Biomass	252.632	0.07081

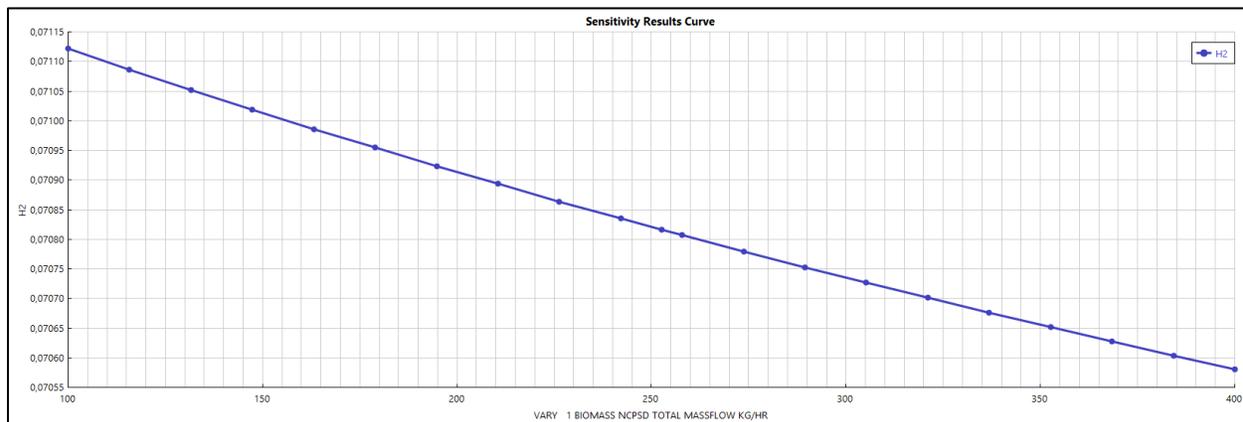
Figura 20

Resultados de análisis de sensibilidad de flujos de corriente de Biomasa de Caña de Azúcar

Row/Case	Status	VARY 1 BIOMASS NCPD TOTAL MA SSFLOW KG/HR	F
1	OK	100	0,0711215
2	OK	115,789	0,0710864
3	OK	131,579	0,0710521
4	OK	147,368	0,0710188
5	OK	163,158	0,0709862
6	OK	178,947	0,0709545
7	OK	194,737	0,0709236
8	OK	210,526	0,0708934
9	OK	226,316	0,0708639
10	OK	242,105	0,0708352
11	OK	252,62	0,0708164

Figura 21

Curva de sensibilidad de flujo de Biomasa de caña de Azúcar vs composición de H2 en la corriente S4



En la Figura 22 se muestra el análisis de sensibilidad en los bloques *COPIROL* para determinar la influencia de la presión en el rendimiento de H₂. Se puede observar que aumentar la presión desfavorece el incremento de la composición de H₂. Así mismo en la Figura 23 se muestra la curva de sensibilidad composición de H₂ vs presión.

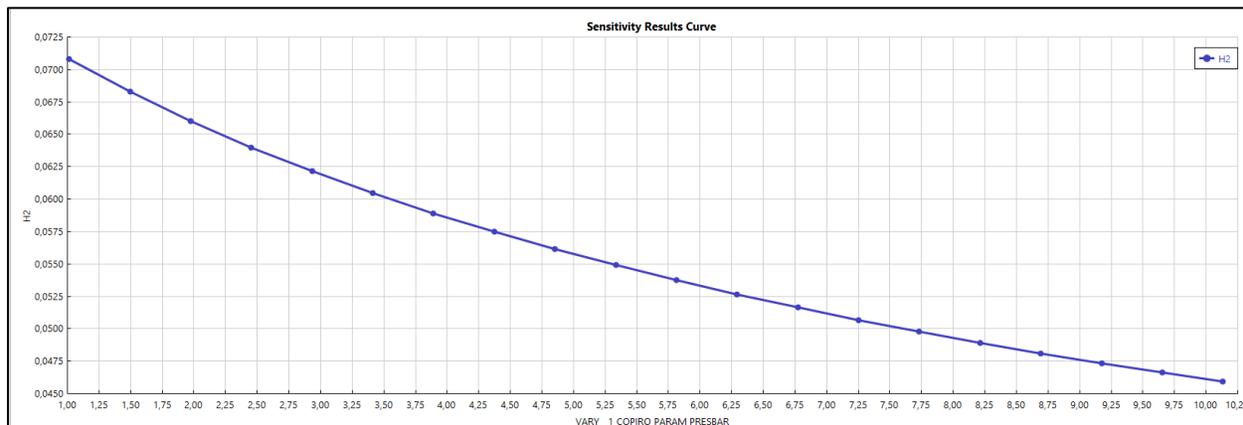
Figura 22

Resultados de los análisis de sensibilidad presión de reactor de copirólisis de Biomasa y LDPE

Row/Case	Status	VARY 1 COPIRO PARAM PRES BAR	H2
1	OK	1,01325	0,0708164
2	OK	1,49321	0,0682894
3	OK	1,97317	0,0660303
4	OK	2,45313	0,0639936
5	OK	2,93309	0,0621443
6	OK	3,41305	0,0604546
7	OK	3,89301	0,0589022
8	OK	4,37297	0,0574691
9	OK	4,85293	0,0561404
10	OK	5,33289	0,0549037
11	OK	5,81286	0,0537488
12	OK	6,29282	0,0526668

Figura 23

Curva de sensibilidad Presión de Reacción de Copirólisis vs Composición de H2



El análisis de sensibilidad realizado en el bloque COPIROL para determinar la influencia de la temperatura en el rendimiento de H2 se muestra en la Tabla 16. Como se evidencia en los resultados obtenidos un aumento de la temperatura permite obtener una mayor composición de H2.

Tabla 16

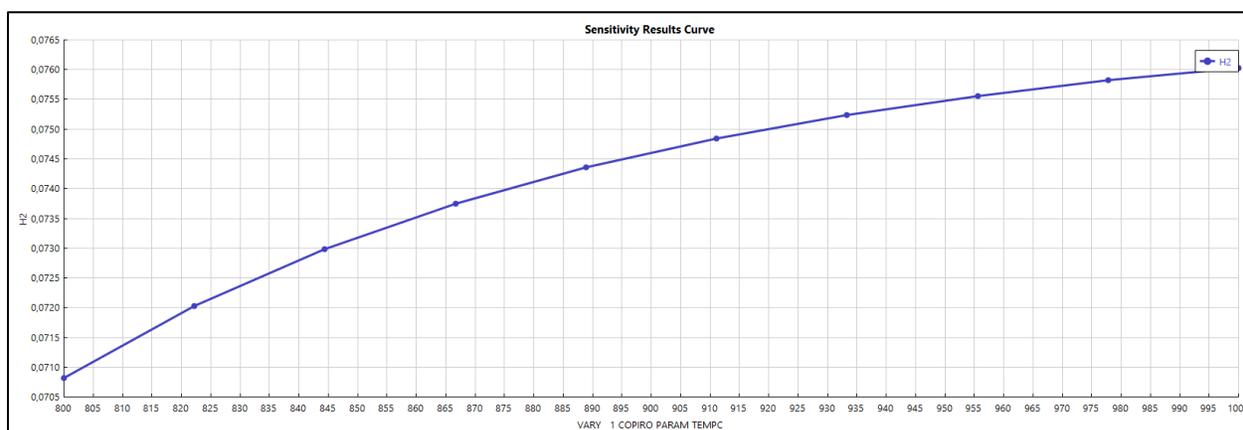
Análisis de sensibilidad de la temperatura en el bloque COPIROL

No.	Temperatura, °C	Composición H2, %masa
1	800	0,07081639
2	822,222222	0,07202365
3	844,444444	0,07298465
4	866,666667	0,07374921

No.	Temperatura, °C	Composición H2, %masa
5	888,888889	0,07435893
6	911,111111	0,07484727
7	933,333333	0,07524055
8	955,555556	0,07555925
9	977,777778	0,07581919
10	1000	0,0760326

Figura 24

Curva de sensibilidad de temperatura de reacción en el reactor de copirólisis vs composición de H2



Se realizó un análisis de sensibilidad en la corriente Aire como se detalla en la tabla Tabla 17 para determinar la influencia del flujo en la composición de H2 en la corriente S4. Nótese en la figura Figura 25 que a mayor flujo másico de Aire la composición de H2 disminuye.

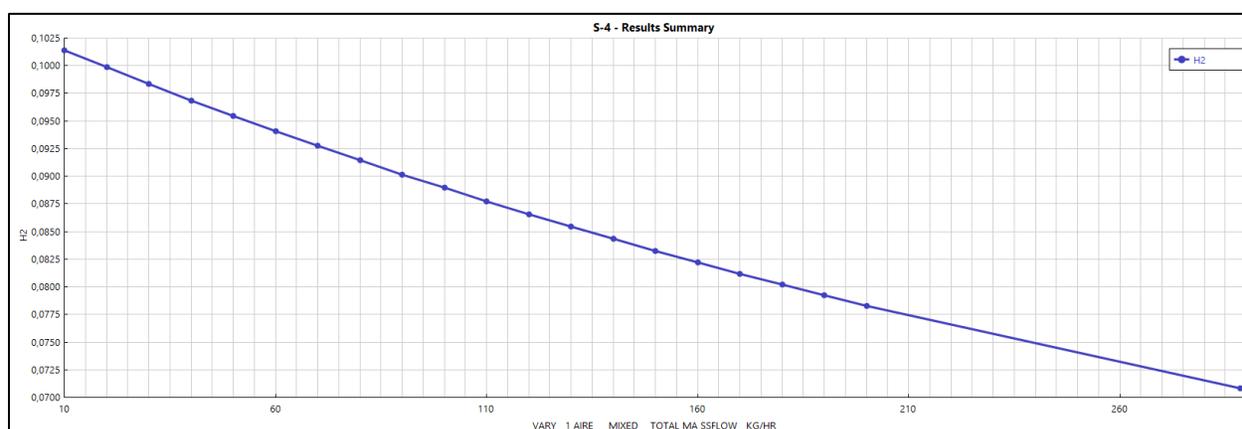
Tabla 17

Análisis de sensibilidad en la corriente de aire

No.	Flujo de Aire, kh/hr	Composición H2, %masa
1	10	0,10140896
2	20	0,09985065
3	30	0,09834052
4	40	0,09687624
5	50	0,09545568
6	60	0,09407688
7	70	0,092738
8	80	0,09143729
9	90	0,09017314
10	100	0,08894401

Figura 25

Curva de análisis de sensibilidad en la corriente de Aire



Para comprobar la influencia de agua en la composición de H2 se realizó un análisis de sensibilidad con el software de simulación de la corriente S7 obteniéndose los datos que se detallan en la Tabla 18. Nótese en la Figura 26 como con el aumento de flujo de la corriente de agua incrementa la composición de H2 en la corriente S4.

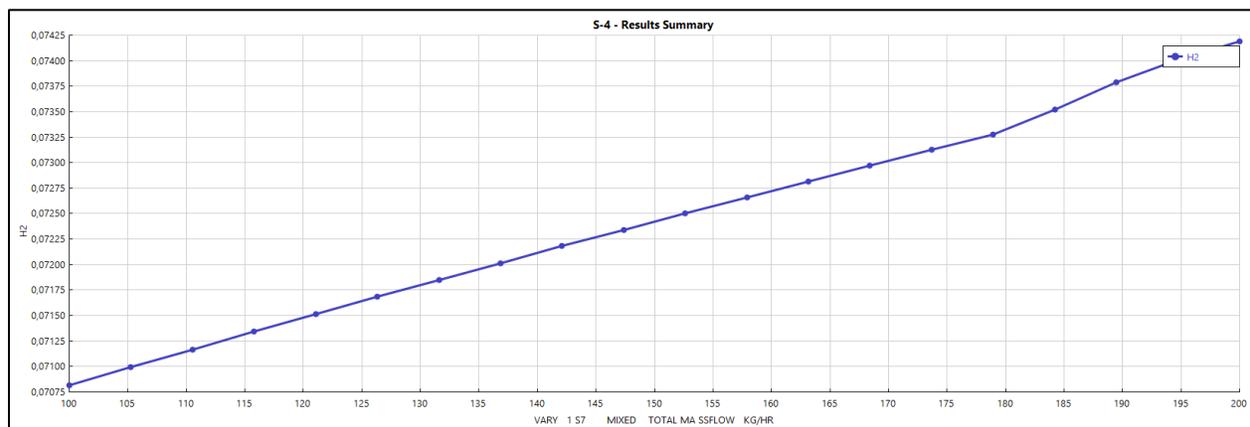
Tabla 18

Análisis de sensibilidad de la corriente de Agua (S7)

No.	Flujo de Agua, kh/hr	Composición H2, %masa
1	100	0,07081639
2	105,263158	0,07099384
3	110,526316	0,07116923
4	115,789474	0,07134263
5	121,052632	0,07151405
6	126,315789	0,07168353
7	131,578947	0,07185111
8	136,842105	0,07201681
9	142,105263	0,07218067
10	147,368421	0,07234271

Figura 26

Curva de análisis de sensibilidad de la corriente de agua (S7)



Capítulo V

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- Para la reacción de pirólisis de polietileno de baja densidad junto con residuos de caña de azúcar como fuente de biomasa, se logró establecer los diagramas de bloque (BFD) y diagramas de flujo (PFD) con las condiciones de operación adecuadas para la producción de gas de síntesis.
- Al realizar la simulación del proceso diseñado se determinó que para la obtención de gas de síntesis la configuración acertada corresponde a una alimentación de caña de azúcar de 252.62 kg/hr y 352.63 kg/hr de LDPE.
- Se determinó que, para incrementar el rendimiento de gas de síntesis, es necesario una relación de flujo másico LDPE/BIOMASA equivalente a 1.4 como alimentación del proceso. Adicionalmente, se configuró una corriente de agua externa que incrementó el rendimiento de H₂ en la reacción de copirólisis.
- Con la configuración diseñada para la simulación se obtuvieron los balances de masa de todo el proceso diseñado, obteniéndose 420.87 kg/hr de gas de síntesis.
- Mediante los análisis de sensibilidad se determinó que la temperatura y la presión tienen efectos determinantes en el proceso de copirólisis de la biomasa y LDPE. A medida que la temperatura aumenta y la presión disminuye, se incrementa la

composición de H₂ en el gas de síntesis. Sin embargo, el gas obtenido tiene mayor proporción de CO en su composición.

- Al realizar la simulación los resultados reflejan que la fuente de biomasa adecuada para el proceso de copirólisis con LDPE son los residuos del bagazo de caña de azúcar, que conforman el grupo de residuos con mayor volumen de actividad agrícola en el Ecuador.

Recomendaciones

- Realizar un ensayo de laboratorio para obtener datos cinéticos del proceso de pirólisis con la fuente de biomasa utilizada y mejorar la composición de hidrógeno en el gas de síntesis.
- Realizar un ensayo de laboratorio con el uso de catalizadores de Níquel que según se reporta en la bibliografía incrementa el rendimiento de gas de síntesis rico en H₂.
- Debido a que en el proceso no se incluye una corriente alterna de metano, se recomienda realizar el estudio mediante un software de simulación reemplazando la corriente de aire por metano para verificar si existe un incremento de gas de síntesis en el reactor de pirólisis.
- Realizar un estudio que considere el uso de una corriente pura de O₂ que reemplace la corriente de aire e ingrese como corriente de alimentación al reactor de copirólisis para incrementar el rendimiento de H₂.

Bibliografía

- Adeniyi, A. G., Eletta, O. A. A., & Ighalo, J. O. (2018). Computer aided modelling of low density polyethylene pyrolysis to produce synthetic fuels. *Nigerian Journal of Technology*, 37(4), 945. <https://doi.org/10.4314/njt.v37i4.12>
- Aguilar, D. (2019). Determinación del potencial energético de la biomasa residual de cultivos de banano en el cantón Machala, El Oro, Ecuador. *Universidad Politécnica Salesiana*, 1–45. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18090/1/UPS-CT008600.pdf>
- Bernard Uzoejinwaa, B., He, X., Shuang, W., El-Fatah Abomohraa, A., Hu, Y., & Wang, Q. (2018). Co-pyrolysis of biomass and waste plastics as a thermochemical conversion technology for high-grade biofuel production: Recent progress and future directions elsewhere worldwide. *Energy Conversion and Management*, 163, 468–492. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.004>
- Bobek-Nagy, J., Gao, N., Quan, C., Miskolczi, N., Rippel-Pethő, D., & Kovács, K. (2020). Catalytic co-pyrolysis of packaging plastic and wood waste to achieve H₂ rich syngas. *International Journal of Energy Research*, 44(13), 10832–10845. <https://doi.org/10.1002/ER.5741>
- Cañarte, J., & Rodríguez, M. (2020). Manejo y disposición de desechos sólidos en planta de producción de vapor por biomasa. *Dominio de Las Ciencias*, 6(1), 775–786. <https://doi.org/10.23857/dc.v6i3.1248>
- Carraher, C. E., & Seymour, R. B. (Raymond B. (2008). *Seymour/Carraher's polymer chemistry*. CRC Press.
- Cheng, F., Bayat, H., Jena, U., & Brewer, C. E. (2020). Impact of feedstock composition on pyrolysis of low-cost, protein- and lignin-rich biomass: A review. In *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* (Vol. 147, p. 104780). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.104780>
- Delgado, C., Navarrete, J., Noles, P., & Hernández, N. (2020). Vista de Caracterización energética y bioeconómica de las briquetas elaboradas con biomasa residual del cultivo de

- maíz en Ecuador | REDIELUZ. *Revista REDIELUZ, Universidad Del Zulia, Venezuela, 10(2)*, 76–86. https://www.researchgate.net/profile/Daniel-Polanco-2/publication/353463958_Variacion_de_la_comunidad_fitoplanctonica_en_piscinas_de_cultivo_semi-intensivo_de_Litopenaeus_vannamei_en_el_lago_de_Maracaibo_Venezuela/links/60feddae2bf3553b29141bd3/Variacion-
- Flores Guamán, F. R. (2022). *Determinación de la capacidad calorífica de biomásas residuales de la producción agrícola del Ecuador*. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/25924>
- Galiwango, E., Abdel Rahman, N. S., Al-Marzouqi, A. H., Abu-Omar, M. M., & Khaleel, A. A. (2019). Isolation and characterization of cellulose and α -cellulose from date palm biomass waste. *Heliyon*, 5(12), e02937. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02937>
- Ghatge, S., Yang, Y., Ahn, J. H., & Hur, H. G. (2020). Biodegradation of polyethylene: a brief review. *Applied Biological Chemistry* 2020 63:1, 63(1), 1–14. <https://doi.org/10.1186/S13765-020-00511-3>
- Hantoko, D., Yan, M., Prabowo, B., Susanto, H., Li, X., & Chen, C. (2019). Aspen plus modeling approach in solid waste gasification. In *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Waste Treatment Processes for Energy Generation* (pp. 259–281). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64083-3.00013-0>
- Harmsen, J., Haan, A. B., & Swinkels, P. L. J. (2018). Product and Process Design. In *Product and Process Design* (Vol. 91, Issue 2, pp. 472–558). <https://doi.org/10.1515/9783110467741>
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC). (2019, July 17). *2018: Seis cultivos con mayor producción en Ecuador* | <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/2018-seis-cultivos-con-mayor-produccion-en-ecuador/>
- Iswadi, D., Nurisa, F., Liastuti, E., Kimia, J. T., Teknik, F., Pamulang, U., Surya, J., No, K., & Selatan, T. (2017). PEMANFAATAN SAMPAH PLASTIK LDPE DAN PET MENJADI BAHAN BAKAR MINYAK DENGAN PROSES PIROLISIS. *Jurnal Ilmiah Teknik Kimia*, 1(2), 77–85.

<http://openjournal.unpam.ac.id/index.php/JITK/article/view/718>

- Jin, X., Lee, J. H., & Choi, J. W. (2022). Catalytic co-pyrolysis of woody biomass with waste plastics: Effects of HZSM-5 and pyrolysis temperature on producing high-value pyrolytic products and reducing wax formation. *Energy*, 239, 121739. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.121739>
- Khan, A. A., de Jong, W., Jansens, P. J., & Spliethoff, H. (2009). Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. *Fuel Processing Technology*, 90(1), 21–50. <https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2008.07.012>
- Mansor, A. M., Lim, J. S., Ani, F. N., Hashim, H., & Ho, W. S. (2019). Characteristics of cellulose, hemicellulose and lignin of MD2 pineapple biomass. *Chemical Engineering Transactions*, 72, 79–84. <https://doi.org/10.3303/CET1972014>
- Morán, S. (2021, February 4). *En Ecuador se lavan miles de toneladas de desechos plásticos sucios de EEUU | Gestión*. Gestión Digital. <https://www.revistagestion.ec/sociedad-analisis/en-ecuador-se-lavan-miles-de-toneladas-de-desechos-plasticos-sucios-de-eeuu>
- Pérez, J. (2016). *Biocombustibles: La ciencia para todos*. Fondo de Cultura Económica. <https://books.google.com/books/about/Biocombustibles.html?hl=es&id=EdaiDQAAQBAJ>
- Quinteros Vaca, O. N. (2020). “CARACTERIZACIÓN DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR DE VARIEDADES DEL INGENIO AZUCARERO TABABUELA PARA BIOENERGÍA.” *Orphanet Journal of Rare Diseases*, 21(1), 1–9. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10478>
- Ricardo Estévez / Ecointeligencia. (2019). *Datos sobre la contaminación que causa el plástico - Ambientum*. Ecointeligencia,. <https://www.ambientum.com/ambientum/residuos/contaminacion-plastico.asp>
- Santos, R. G. dos, & Alencar, A. C. (2020). Biomass-derived syngas production via gasification process and its catalytic conversion into fuels by Fischer Tropsch synthesis: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(36), 18114–18132. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.133>

- Seider, W. D., Seader, J. D., & Lewin, D. R. (2018). Product and Process Design Principles: Synthesis, Analysis and Design. In *Product and Process Design Principles: Synthesis, Analysis and Design* (Vol. 91, Issue 2, pp. 472–558). https://www.academia.edu/16568227/208468464-Product-and-Process-Design-Principles-Synthesis-Analysis-and-Design-Third-Edition_1_
- Siddiqi, H., Kumari, U., Biswas, S., Mishra, A., & Meikap, B. C. (2020). A synergistic study of reaction kinetics and heat transfer with multi-component modelling approach for the pyrolysis of biomass waste. *Energy*, 204, 117933. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117933>
- Solíz, M. F., & Morán, S. (2021). *La Partida 3915 Importación de desechos plásticos en Ecuador*. <https://repositorio.uasb.edu.ec/handle/10644/8033>
- Towler, G., & Sinnott, R. (2021). Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design. In *Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821179-3.01001-3>
- Vergaria Carpio, R. G. (2022). Caracterización física y energética del residuo fibroso proveniente del procesamiento de la palma africana variando el porcentaje de humedad para aprovechamiento bioenergético en la empresa Quevepalma. In *repositorio.espe.edu.ec*. <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/28641/1/T-ESPE-050971.pdf>
- Xu, D., Xiong, Y., Zhang, S., & Su, Y. (2021). The synergistic mechanism between coke depositions and gas for H₂ production from co-pyrolysis of biomass and plastic wastes via char supported catalyst. *Waste Management*, 121, 23–32. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2020.11.044>
- Yun, Y. (2012). Gasification for Practical Applications. In *Gasification for Practical Applications*. InTech. <https://doi.org/10.5772/3132>
- Zheng, Y., Tao, L., Yang, X., Huang, Y., Liu, C., & Zheng, Z. (2018). Study of the thermal behavior, kinetics, and product characterization of biomass and low-density polyethylene co-pyrolysis

by thermogravimetric analysis and pyrolysis-GC/MS. In *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* (Vol. 133, pp. 185–197). <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.04.001>

ANEXOS