



Desarrollo y evaluación del proceso de copirólisis para el tereftalato de polietileno (PET) junto con biomasa, para la obtención de gas de síntesis, mediante un software de simulación de procesos químicos.

Garzón Morillo, Mishel Estefany

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Petroquímica

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Petroquímica

Ing. Sayavedra Delgado, Jonathan Javier. Msc

15 de agosto del 2022

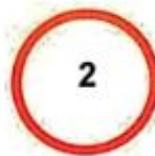
Latacunga



Trabajo de UIC Garzon.pdf
Scanned on: 2:6 August 12, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found

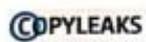


Total Words in Text

Identical Words	36
Words with Minor Changes	29
Paraphrased Words	0
Omitted Words	3445

Website | Education | Businesses

Ing. Sayavedra Delgado, Jonathan Javier
C. C 0502865850





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Petroquímica

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: "Desarrollo y evaluación de un proceso de co-pirólisis para el tereftalato de polietileno (PET) junto con biomasa, para la obtención de gas de síntesis, mediante un software de simulación de procesos químicos, fue realizado por la señorita Garzón Morillo Mishel Estefany, 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 analizada 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

Latacunga, 15 de agosto del 2022

Firma:

Ing. Sayavedra Delgado, Jonathan Javier

C. C 0502865850



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Petroquímica

Responsabilidad de autoría

Yo, **Garzón Morillo Mishel Estefany**, con cédula de ciudadanía n° **100433717-4**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular **"Desarrollo y evaluación de un proceso de co-pirólisis para el tereftalato de polietileno (PET) junto con biomasa, para la obtención de gas de síntesis, mediante un software de simulación de procesos químicos."** es de mi autoría propia 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

Firma:

Garzón Morillo, Mishel Estefany

C.C.: 1004337174



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Petroquímica

Autorización de publicación

Yo, **Garzón Morillo Mishel Estefany**, con cédula de ciudadanía n° 1004337174 autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **"Desarrollo y evaluación de un proceso de co-pirólisis para el tereftalato de polietileno (PET) junto con biomasa para la obtención de gas de síntesis, mediante un software de simulación de procesos químicos"**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 15 de agosto del 2022

Firma:

Garzón Morillo, Mishel Estefany

C.C.: 1004337174

Dedicatoria

Este logro se lo dedico en primer lugar a mi papito Dios por ser mi fortaleza en cada etapa de mi vida, por cuidarme, guiarme y levantarme en cada caída que he tenido, y sobre todo por permitir que mi familia se encuentre a mi lado.

A mi padre Antonio Garzón quien me ha enseñado con su discapacidad a nunca darse por vencido y buscar siempre caminos para salir adelante pese a las dificultades y obstáculos que se presentan en la vida; por su paciencia e infinito amor.

A mi madre Blanca Morillo, quien, ha sido mi pilar fundamental a lo largo de mi vida y por ser una de las personas más importante en mi vida, que además de ello es mi mejor amiga. Su gran amor, consejos, apoyo incondicional y siempre creer en mí, han hecho que me levante por más caídas que tenga.

A mis hermanos José Luis, Patricio, Cristian por estar ahí para mí cuando más lo he necesitado animándome a culminar esta etapa de mi vida, por la confianza puesta en mí, pero sobre todo a mi hermana Katy quien ha sido mi amiga leal y el regalo más hermoso que Dios me pudo dar junto con sus dos nenitas Janina y Sofia.

A todos mis sobrinos a quienes amo con el alma, por ser mi alegría.

A mis familiares y amistades quienes me ayudan a crecer de manera personal y profesionalmente, para ser mejor persona cada día.

Agradecimientos

Agradezco inmensamente a mis padres por creer en mí, aun cuando yo no lo hacía, por enseñarme valores y a salir siempre adelante, gracias por enseñarme que con esfuerzo y dedicación se puede lograr todo lo que uno se propone, por apoyarme en cada decisión, por nunca dejarme sola y ser lo mejor que Dios me pudo dar como padres.

Agradezco a cada uno de mi familia, por ser mi apoyo incondicional

Agradezco profundamente al Ingeniero Euro Mena, por ser para mí un padre y guía desde que lo conocí en la Universidad, siempre ha estado ahí con un consejo en los buenos y malos momentos, por siempre apoyarme y creer en mí, pese a todo lo malo que he pasado. Lo aprecio demasiado mi eterna admiración.

Agradezco a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L, por brindarme los mejores momentos de mi vida, ya que aquí es en donde viví experiencias únicas, conocí personas que dejaron en mí una enseñanza para crecer de manera personal y profesional.

Agradezco a Alex Cabrera y a nuestra historia MAGC, por apoyarme, acompañarme, por ser mi soporte para no sentirme sola lejos de mi familia, por brindarme los mejores momentos de mi vida y estar en los momentos más difíciles. Por ayudarme a creer en mí y superarme después de todo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Carátula.....	1
Reporte de verificación.....	2
Certificación.....	3
Responsabilidad de autoría	4
Autorización de publicación	5
Dedicatoria	6
Agradecimientos	7
Índice de contenido.....	8
Índice de tablas.....	14
Índice de figuras	15
Índice de ecuaciones	17
Resumen.....	18
Abstract	19
Capítulo I: Introducción	20
Antecedentes	20
Planteamiento del Problema	21
Justificación e importancia.....	23
Objetivos	24
<i>Objetivo General</i>	24
<i>Objetivos Específicos</i>	24
Hipótesis.....	25
Variables de investigación	25
<i>Variable independiente</i>	25
<i>Variable dependiente</i>	25
Capítulo II: Marco teórico	26
Química verde	26

<i>Historia</i>	26
<i>Definición</i>	26
<i>Los 12 principios de la Química Verde/sostenible</i>	27
<i>Futuros retos de la Química Verde</i>	31
Plásticos	31
<i>Clasificación de los plásticos</i>	31
<i>Propiedades de los plásticos</i>	33
<i>Reciclaje de residuos plásticos</i>	33
Tereftalato de polietileno (PET)	33
<i>Propiedades</i>	34
<i>Características</i>	35
<i>Usos</i>	35
Biomasa	36
<i>Inicios</i>	36
<i>Definición</i>	36
<i>Composición de la biomasa</i>	37
<i>Composición estructural de algunas biomásas</i>	38
<i>Propiedades de la Biomasa</i>	39
<i>Clasificación de la Biomasa</i>	39
<i>Biomasa como oportunidad potencial fuente de energía</i>	40
<i>Biomasa en el Ecuador</i>	41
<i>Procesos de transformación para la biomasa</i>	42
Procesos Termoquímicos.	42
Procesos Químicos y Bioquímicos.....	44
Pirólisis	45
<i>Definición</i>	45
<i>Copirolisis</i>	46

Gas de síntesis	48
<i>Componentes del gas de síntesis</i>	48
<i>Tecnología y producción de gas de síntesis</i>	50
Materia prima para obtención.	50
Diseño de procesos	50
<i>Limitaciones que influyen al diseño de procesos</i>	52
<i>Síntesis de proceso</i>	53
<i>Simulación de procesos</i>	54
Simulación de procesos químicos.	55
Simulador Aspen PLUS.	55
Clasificación para selección de Componentes	57
<i>Paquetes termodinámicos</i>	58
Diagrama de procesos	59
<i>Diagrama de flujo de bloques (BFD)</i>	60
<i>Diagrama de flujo de procesos (PFD)</i>	60
Análisis próximos, últimos y de azufre	62
Modelos de experimentación	62
<i>Modelo Cinético</i>	62
<i>Modelo termodinámico</i>	63
Redox	63
Capítulo III: Metodología.....	65
Desarrollo del proceso	65
<i>Materias Primas</i>	65
Caracterización/ Propiedades físicas de las materias primas.	66
Diagrama de procesos.....	68
<i>Diagrama de Flujo (BFD)</i>	68

<i>Diagrama de Flujo de procesos (PFD)</i>	70
Metodología experimental.....	71
<i>Componentes presentes en la simulación</i>	71
<i>Equipos para utilizar en la simulación</i>	72
Simulación.....	75
<i>Selección de los componentes</i>	75
<i>Selección de paquete termodinámico</i>	76
<i>Desarrollo de la simulación: Modelo termodinámico</i>	77
Unidad de secado simulación 1.....	77
Unidad de pirólisis simulación 1.	80
Unidad de descomposición materias primas	
PET/Biomasa simulación 2.....	83
Unidad de pirólisis simulación 2.	84
<i>Diseño de simulación: modelo cinético simulación 2</i>	84
Caracterización química del gas	85
Capítulo IV: Resultados y discusiones.....	87
Productos obtenidos de cada simulación.....	87
<i>Configuración 1 (modelo termodinámico)</i>	87
<i>Configuración 2 (modelo termodinámico)</i>	88
<i>Configuración 3 (modelo cinético)</i>	90
Puntos óptimos de trabajos para mayor obtención de gas de síntesis	91
<i>Análisis de sensibilidad para encontrar las condiciones</i>	
<i>óptimas para la configuración 1</i>	91
Configuración 1 separador de H ₂ O.....	91
Configuración 1 Reactor Gibbs	93
<i>Análisis de sensibilidad para encontrar las condiciones</i>	
<i>óptimas para la configuración 3</i>	93

Configuración 3 Reactor CSTR (T).....	93
Configuración 3 reactor CSTR (P).....	94
Productos obtenidos de cada simulación con puntos óptimos.....	95
<i>Configuración 1 (modelo termodinámico)</i>	95
<i>Configuración 3 (Método cinético)</i>	97
<i>Discusión de Configuraciones</i>	98
Propuesta rendimiento de obtención de gas de síntesis.....	99
<i>Diagramas de flujo propuesta</i>	100
<i>Análisis de sensibilidad en equipos configuración 1</i>	104
Análisis de sensibilidad en separador de compuestos volátiles.....	104
Análisis de sensibilidad en reactor de oxidación y reducción.....	105
<i>Respuesta de la configuración 1</i>	107
<i>Análisis de sensibilidad equipos de la configuración 2</i>	108
Análisis de sensibilidad en reactor de oxidación y reducción.....	108
<i>Respuesta de la configuración 2</i>	110
Discusión de la configuración con los mejores resultados.....	111
Balance de energía para conocer que configuración tiene un menor gasto de Energía.....	112
<i>Tabla de balance de energía en cada configuración</i>	112
Simulaciones en el software de simulación de procesos químicos	113
Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones.....	116
Conclusiones	116
Recomendaciones.....	118
Bibliografía	119

Anexos 126

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Principios de la Química Verde postulados por Anastas y Jhon Waner.</i>	28
Tabla 2	<i>Fracción lignocelulósica de varios tipos de biomasa.</i>	38
Tabla 3	<i>Flujos máxicos de alimentación en las simulaciones.</i>	65
Tabla 4	<i>Propiedades Físicas Materias Primas (Cascarilla de Arroz/PET).</i>	66
Tabla 5	<i>Propiedades Físicas Cascarilla de arroz y PET.</i>	67
Tabla 6	<i>Descripción de equipos usado en el software de simulación.</i>	72
Tabla 7	<i>Cinética de reacción para las tasas de conversión en un reactor gasificador.</i>	85
Tabla 8	<i>Contenidos del gas de Síntesis.</i>	85
Tabla 9	<i>Composición máxicas de los productos obtenidos en la configuración 1.</i>	87
Tabla 10	<i>Composiciones máxicas obtenidas configuración 2.</i>	88
Tabla 11	<i>Composiciones máxicas obtenidas de la configuración 3.</i>	90
Tabla 12	<i>Composiciones máxicas obtenidas configuración 1.</i>	95
Tabla 13	<i>Composiciones máxicas obtenidas configuración 3.</i>	97
Tabla 14	<i>Composición en flujo máxico en la corriente de gas de síntesis en cada configuración.</i>	98
Tabla 15	<i>Lista de reacciones de gasificación típicas.</i>	99
Tabla 16	<i>Conversiones y flujos molar de los producto configuración 1.</i>	106
Tabla 17	<i>Conversiones y Flujos molar de productos</i>	107
Tabla 18	<i>Composiciones máxicas de productos configuración 1.</i>	107
Tabla 19	<i>Determinación de la conversión para la unidad de oxidación</i>	109
Tabla 20	<i>Determinación de la conversión para la unidad de reducción</i>	109
Tabla 21	<i>Composición del gas de síntesis en la configuración 2.</i>	110
Tabla 22	<i>Flujo máxico de las configuraciones</i>	112
Tabla 23	<i>Energía utilizada para la obtención de gas de síntesis.</i>	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	<i>Ciclo del carbono a lo largo de la producción y utilización de la biomasa....</i>	41
Figura 2	<i>Pasos involucrados en un proceso típico de gasificación.....</i>	46
Figura 3	<i>Co-pirólisis de biomasa residuos plásticos.....</i>	48
Figura 4	<i>Diagrama de Cebolla.</i>	53
Figura 5	<i>Árbol de decisión o selección de paquete termodinámico.</i>	59
Figura 6	<i>Proceso de obtención de Metanol.</i>	60
Figura 7	<i>Ejemplo diagrama de flujo de procesos (PFD).....</i>	61
Figura 8	<i>Diagrama de flujo de bloques del proceso de obtención (BFD) configuración 1.....</i>	69
Figura 9	<i>Diagrama de flujo de bloques del proceso de obtención (BFD) configuraciones 2 y 3.....</i>	69
Figura 10	<i>Diagrama de flujos del proceso para la obtención del gas de síntesis configuración 1</i>	70
Figura 11	<i>Diagrama de flujos del proceso para la obtención del gas de síntesis configuración 2 y 3.....</i>	70
Figura 12	<i>Selección de componentes.....</i>	75
Figura 13	<i>Componentes sólidos no convencionales.</i>	75
Figura 14	<i>Componentes sólidos.....</i>	76
Figura 15	<i>Selección del paquete termodinámico.....</i>	77
Figura 16	<i>Unidad de secado.</i>	78
Figura 17	<i>Ingreso de Propiedades Proxanal de Biomasa de alimentación.</i>	79
Figura 18	<i>Ingreso de Propiedades Ultanal de Biomasa de alimentación.</i>	79
Figura 19	<i>Ingreso de Propiedades Sulfanal de Biomasa de alimentación.....</i>	80
Figura 20	<i>Unidad de Pirólisis.</i>	80
Figura 21	<i>Block Calculator.</i>	81
Figura 22	<i>Mezcla de Corrientes Materia Prima.</i>	83

Figura 23 <i>Proceso de Pirólisis</i>	84
Figura 24 <i>Análisis de sensibilidad para el Separador de H₂O con respecto a la temperatura</i>	91
Figura 25 <i>Análisis de sensibilidad para el separador de H₂O con respecto a la presión</i>	92
Figura 26 <i>Análisis de sensibilidad al equipo PYRGIBBS</i>	93
Figura 27 <i>Análisis de Sensibilidad para el Equipo</i>	94
Figura 28 <i>Análisis de sensibilidad de la presión en el Reactor CSTR</i>	95
Figura 29 <i>Diagrama de flujo de bloques del proceso de obtención configuración 1 con propuesta</i>	101
Figura 30 <i>Diagrama de flujo de bloques del proceso de obtención configuraciones 2 y 3 con propuesta</i>	101
Figura 31 <i>Diagrama de flujos del proceso para la obtención del gas de síntesis configuración 1 con propuesta</i>	102
Figura 32 <i>Diagrama de flujos del proceso de obtención del gas de síntesis configuraciones 2 y 3 con propuesta</i>	103
Figura 33 <i>Análisis de sensibilidad unidad de separación de volátiles Presión vs Fracción másica</i>	105
Figura 34 <i>Análisis de sensibilidad unidad de separación de volátiles Temperatura vs Fracción másica</i>	105
Figura 35 . <i>Simulación del proceso químico configuración 1</i>	114
Figura 36 . <i>Simulación del proceso químico configuración 2 y 3</i>	115

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 <i>Lenguaje FORTRAN</i>	81
Ecuación 2 <i>Lenguaje Fortran (Agua)</i>	81
Ecuación 3 <i>Lenguaje Fortran (ASH)</i>	81
Ecuación 4 <i>Lenguaje Fortran (C)</i>	82
Ecuación 5 <i>Lenguaje Fortran (Hidrógeno)</i>	82
Ecuación 6 <i>Lenguaje Fortran (Nitrógeno)</i>	82
Ecuación 7 <i>Lenguaje Fortran (Cloro)</i>	82
Ecuación 8 <i>Lenguaje Fortran (Azufre)</i>	82
Ecuación 9 <i>Lenguaje Fortran (Oxígeno)</i>	82

Resumen

En la presente investigación se realiza el desarrollo y evaluación de un proceso de co-pirólisis para el tereftalato de polietileno (PET) junto con biomasa para la obtención de gas de síntesis, mediante el uso del software de simulación de procesos químicos, se toma como base estudios realizados en artículos científicos y tesis verificadas. Se realiza una descripción detallada del proceso de obtención gas de síntesis tomando en cuenta la biomasa que se encuentra entre los primeros con mayor cantidad de residuos obtenidos en el Ecuador. Se desarrolla un análisis de las operaciones unitarias a utilizar, mediante el uso de diagramas de flujos (BFD y PFD). Se emplea los análisis ultanal, sulfanal y proxanal correspondientes de Polietilentereftalato (PET) y de la cascara de arroz, para realizar la descomposición en sus atributos con el uso del lenguaje FORTRAN. Mediante el diseño de un modelo termodinámico y un cinético, se logró comparar las composiciones másicas que obtienen al final del proceso. Asimismo, se realizó análisis de sensibilidad en las operaciones unitarias, para conocer las condiciones óptimas que permitan la obtención de mayor cantidad de gas de síntesis en cada una de las configuraciones propuestas. Por otra parte, se ejecuta una propuesta de diseño para el proceso de co-pirólisis permitiendo obtener mayor cantidad de productos finales importantes para la industria química como son: monóxido de carbono, hidrógeno, dióxido de carbono y metano. En base las comparaciones respectivas la configuración uno, el cual presenta las unidades de secado, pirolisis, reacciones de oxido- reducción y de separación de solidos es la óptima para la producción de gas de síntesis, al igual que presenta menor consumo de energía que las demás.

Palabras clave: Pirólisis, tereftalato de polietileno (PET), gas de síntesis y biomasa

Abstract

In the present research, the development and evaluation of a co-pyrolysis process for polyethylene terephthalate (PET) is carried out together with biomass to obtain synthesis gas, using chemical process simulation software, studies carried out in scientific articles and verified these are based. A detailed description of the process of obtaining synthesis gas is made considering the biomass that is among the first with the highest amount of waste obtained in Ecuador. An analysis of the unit operations to be used is developed through flowcharts (BFD and PFD). The corresponding ultimate, sulfanal and proxanal analyses of Polyethylene terephthalate (PET) and rice husk are used to perform the decomposition of their attributes with the use of the FORTRAN language. By designing a thermodynamic and kinetic model, it was possible to compare the mass compositions they obtain at the end of the process. Likewise, sensitivity analysis was carried out in the unit operations, to know the optimal conditions that allow the obtaining of a greater amount of synthesis gas in each of the proposed configurations. On the other hand, a design proposal is executed for the co-pyrolysis process allowing to obtain a greater number of important final products for the chemical industry such as: carbon monoxide, hydrogen, carbon dioxide, and methane. Based on the respective comparisons, configuration one, which presents the units of drying, pyrolysis, oxide-reduction reactions, and solid separation is the most optimal to produce synthesis gas, as well as having lower energy consumption than the others.

Keywords: Pyrolysis, polyethylene terephthalate (PET), syngas, and biomass

Capítulo I

Introducción

Antecedentes

Desde la década de 1950 hasta hoy en día, se ha producido a gran escala plástico, demostrando un asombroso crecimiento nivel mundial, superando a la mayoría de los materiales fabricados por el hombre, se menciona que la contaminación plástica se habría encontrado inicialmente en el océano alrededor de la década de 1970, pero ahora se está se ha convertido en un problema tan frecuente, que para el 2050 se predice que podríamos tener más plásticos que océano. (Syvitski et al., 2020)

El uso de fuentes de energía renovable aumenta la seguridad energética y permite a los países alcanzar sus objetivos de mitigación climática. La combinación energética de Ecuador está dominada por el uso de combustibles fósiles y produce solo el 7,8% de su suministro de energía a partir de energías renovables. El análisis de escenarios sugiere que utilizando el ejemplo de las políticas internacionales de energía renovable se logrará un desarrollo energético sostenible en Ecuador. (Arroyo & Miguel, 2020)

Según (Lewis, 1981), resalta que la energía de la biomasa ahora está regresando seriamente en términos de su consideración como una opción significativa de suministro de energía tanto en los países subdesarrollados como en desarrollo del mundo. Sin embargo, en realidad la biomasa ya suministra en la región el 15% de la energía del mundo, pero debido a que está clasificado como un combustible 'no comercial', a diferencia del carbón, el gas, el petróleo y la electricidad 'comerciales' no está bien documentado en las estadísticas mundiales oficiales de energía.

Los esfuerzos para prevenir la tala de árboles a gran escala fueron generalmente condenado al fracaso, pero la situación se estaba volviendo grave y una

alternativa sólo había que encontrar combustible, desde tiempos atrás hasta hoy en día, la biomasa tiene la ventaja obvia de almacenar energía, probablemente el factor más importante en comparación con los otros sistemas de energía renovable (Lewis, 1981).

El Polietilentereftalato (PET) se compone únicamente de C, H y O, y contiene grandes cantidades de carbono (más del 60% en peso de C en PET). Se conoce que cerca de 500 millones de unidades de botellas de plástico PET se producen cada año, esperándose de tal forma, un crecimiento anual del 4,8 % entre 2017 y 2025, considerando que la mayoría de estos productos PET son desechados en vertederos u océanos. Por lo tanto, existen residuos de PET considerablemente accesibles, y su coste de eliminación puede ahorrarse si se recicla. (Yuan et al., 2020)

(Yuan et al., 2020), pronosticó que una crisis ambiental derivada al uso del Polietilentereftalato (PET), será tan grave como el cambio climático, causado principalmente por las emisiones de CO_2 ; debido a que el PET es un plástico que no se biodegrada y solo se fotodegrada, el PET al llegar ser un desecho se descompone en fragmentos más pequeños con el tiempo. Los microplásticos que se originan a partir de residuos de PET pueden existir en ecosistemas acuáticos y marinos, y eventualmente pueden ser ingeridos y acumulados en organismos vivos.

En octubre de 2018, el New York Times informó que los microplásticos, llegan al intestino humano, lo que también se presentó en una conferencia de gastroenterología en Viena, lo que implica que los desechos plásticos se están volviendo cada vez más peligrosos más allá de la imaginación humana.

Planteamiento del Problema

En los últimos años, el rendimiento de los plásticos a nivel mundial ha estado creciendo continuamente y, hasta la fecha, 8.300 millones de toneladas métricas (t) de

plásticos se han producido en todo el mundo. Los desechos plásticos están causando serios problemas ambientales, por lo que tal, contaminación plástica se ha convertido en un problema generalizado y se ha ganado una atención considerable en los últimos años del público. Los estudios han demostrado que una gran cantidad de desechos plásticos se vierten en océanos y ríos. (Chu et al., 2021)

Reciclar los desechos plásticos cada vez se ha convertido en la mayor preocupación mundial urgente. Uno de los métodos más convenientes para el reciclaje de plástico es la pirólisis, debido a su naturaleza ecológica y sus propiedades intrínsecas, es decir, inercia química, mecánica, resistencia a la presión, durabilidad, versatilidad, flexibilidad y bajo costo de producción, junto con la estabilidad térmica de los aditivos y estabilizadores utilizados en la fase de producción. (Osman et al., 2020) Comprender el proceso de pirólisis y el mecanismo de degradación es fundamental para el diseño del reactor y el escalado. Por lo tanto, estudiamos el modelado cinético del proceso de pirólisis de uno de los plásticos más comunes, el tereftalato de polietileno (PET). El objetivo era comprender y predecir mejor la pirólisis de PET al hacer la transición a una economía baja en carbono y adherirse a la legislación ambiental y gubernamental. (Osman et al., 2020)

Con el aumento de la población mundial, se espera que aumente a una tasa del 6,9% para el período de pronóstico de 2017-2025. A pesar de las útiles aplicaciones del PET que contribuye a nuestra vida cotidiana, su eliminación en el medio ambiente crea serios problemas ya que el producto final obtenido a partir del PET tarda aproximadamente entre 300 y 450 años en descomponerse de forma natural.

En Ecuador la realidad no es distinta, la producción, el consumo y la generación de desechos plásticos ha crecido de manera descontrolada, por lo que la

generación y aplicación de normativas que regulen el comportamiento de la sociedad es absolutamente necesario y urgente. (Portilla-Jiménez, 2022)

Justificación e importancia

Según la investigación de Atlas de Bioenergía del Ecuador, presenta información relacionada con la geolocalización de los principales cultivos y centros de crianza de ganado a lo largo del país. En cuanto a los tipos de biomasa agrícola residual, donde seleccionaron los diez principales productos para determinar la cantidad de biomasa residual generada durante su ciclo de producción: arroz, banano, cacao, café, caña de azúcar, maíz, palma aceitera, plátano, piña y palmito. Estos cultivos fueron seleccionados ya que comparten el 84% de la producción agrícola nacional total en el Ecuador. Además, estos cultivos están ligados a la generación del 79% de la biomasa residual total generada por los cultivos permanentes y estacionales en Ecuador. (Posso et al., 2020)

Estudios realizados en el Ecuador por (Posso et al., 2020) han demostrado que producción de hidrógeno a partir de residuos obtenidos de cada provincia, se puede obtener mediante tres métodos de producción, el más importante el método de gasificación proceso de alto rendimiento, viable ambientalmente y económicamente, este proceso puede ser llevado a cabo a gran escala debido a la disponibilidad de biomasa existentes en el país y sobre todo por su bajo costo, ya que esta biomasa actualmente es el residuo desaprovechado de las industrias alimentarias y químicas.

Ventajosamente en cada provincia del Ecuador existe una alta cantidad de residuos generados por productos como el banano, arroz, cacao, palma africana entre otros; un ejemplo, de ello, tenemos en la provincia de Cotopaxi, el cual es considerado como el sector alimentario, forestal y florícola más importante en el país, por la generación de biomasa de origen vegetal, estos desechos para las industrias químicas

es muy importante, debido a los numerosas aplicaciones y aprovechamiento que se le da. (Posso et al., 2020)

Los procesos comunes que permiten convertir materiales como la biomasa en combustibles o productos químicos valiosos e importantes son por ejemplo las reacciones térmicas las cuales aprovechan del proceso del pirólisis de biomasa para producir carbón vegetal, gases como hidrógeno gas de síntesis y aceite. Además, se sabe que el gas de síntesis y, en algunos casos como el aceite de pirólisis también, suelen ser usados para la producción de combustibles con una alta calidad. (Axelsson et al., 2012)

La conversión de desechos plásticos en combustible por pirólisis ha sido reconocida como una estrategia potencial para la comercialización. La cantidad de residuos plásticos es básicamente diferente para cada país, que normalmente se refiere a datos de plásticos no reciclados. El presente proyecto se encuentra ligada a los 12 principios de la química verde que menciona (Ivanković, 2017) en su investigación, las cuales se considera aplicables las siguientes.

Maximizar la economía atómica

Diseño de síntesis químicas menos peligrosas

Uso de materias primas renovables/sostenible

Prevención de desperdicio

Objetivos

Objetivo General

- Desarrollar y evaluar un proceso de copirólisis para la obtención de gas de síntesis a partir del Polietilentereftalato (PET) junto con biomasa.

Objetivos Específicos

- Describir las posibles operaciones unitarias para el proceso de obtención del gas de síntesis, mediante diagramas de flujo.
- Obtener las condiciones de operación óptimas a través de un análisis de sensibilidad que permitan la obtención de mayor cantidad de gas de síntesis
- Comparar la cantidad de productos gaseosos como: monóxido de carbono, metano, hidrógenos y dióxido de carbono, con referencias experimentales.

Hipótesis

¿Se podrá encontrar un desarrollo óptimo para la obtención de gas síntesis mediante una reacción de pirólisis entre Polietilentereftalato PET junto con biomasa?

Variables de investigación

Variable independiente

Cantidad Biomasa necesaria.

Cantidad de Polietilentereftalato (PET)

Variable dependiente

Síntesis del SYNGAS

- Temperaturas de proceso
- Composición
- Presión

Capítulo II

Marco teórico

Química verde

Historia

Durante las dos últimas dos décadas, la Química Verde ha ganado gradualmente una amplia aceptación en la comunidad científica. Comprensiblemente, la idea de continuar con el desarrollo de la química de una manera más sostenible fue un concepto atractivo para científicos e ingenieros en la generación actual. Un aspecto clave para la asimilación e implementación de la Química Verde es que este nuevo concepto viene ligado a una serie de pautas. El movimiento de la química verde ganó apoyo como disciplina principal a principios de la década de 1990 y hoy muchas de las empresas se han centrado en su investigación. Desde entonces, ha habido importantes contribuciones a nivel mundial, con más de 50 000 publicaciones en esta área.(Ardila-fierro & Hernández, 2021)

Definición

Según (Marco et al., 2019), considera que la definición apropiada a Química Verde es el uso de conocimientos químicos y habilidades para reducir o eliminar el uso de sustancias tóxicas, como también la generación de sustancias peligrosas durante el proceso de productos químicos con el fin de minimizar las posibles amenazas a la salud de los operadores y el medio ambiente.

Como una nueva rama de la química con enfoques ecológicos, implica reducir o eliminar el uso de sustancias nocivas en los procesos químicos, así como eliminar productos nocivos y tóxicos. Para ser una química "Verde", cada reacción debe tener tres componentes verdes: incluido el solvente reactivo/catalizador y el consumo de energía. Además, la química verde busca la mejor manera de eliminar de residuos

industriales y realizar un diseño del proceso de degradación de los productos químicos después de su uso. (Mohammed & Errayes, 2020)

(Anastas & Eghbali, 2010) argumenta que, la química verde puede ser campo emergente relativamente nuevo que busca trabajar a nivel molecular para lograr la sostenibilidad. El campo ha recibido un amplio interés en la última década debido a su capacidad para aprovechar la innovación química para cumplir con los objetivos ambientales y económicos simultáneamente. Existen tres ítems principales sobre el campo de la Química Verde los cuales son:

- Diseños de una Química sostenible en todas las etapas de vida química.
- Química Verde se encarga de diseñar productos y procesos químicos para reducir su riesgo.
- La Química Verde funciona como un sistema de partida para el diseño de procesos químicos.

Los 12 principios de la Química Verde/sostenible

Alrededor de los 1998, Paul Anastas y John Warner realizaron su primer publicación de un manual de Química Verde, en la historia de la química, en el que propusieron 12 principios muy importantes, estos han sido descritos en la **Tabla 1**, (Marco et al., 2019). Estos principios se consideran como un manual para el diseño de nuevos productos y procesos químicos, que se aplican a todos los aspectos del proceso, es decir desde las materias primas utilizadas hasta la eficiencia y seguridad de la transformación, la toxicidad y la biodegradabilidad de los productos y reactivos utilizados.

Tabla 1*Principios de la Química Verde postulados por Anastas y Jhon Waner.*

Número	Principio	Descripción del principio
1	Prevención	Busca la prevención de la generación de residuos. Es mejor evitar generar residuos que tratarlos después de su generación
2	Economía atómica	Planificarse los métodos sintéticos de manera en que el producto obtenido incorpore en si la mayor cantidad posible de los reactivos usados durante el proceso. De esta forma, se minimiza la generación de residuos.
3	Una síntesis química más segura y confiable	Delinear un método sintético que permita usar y generar sustancias con baja o ninguna toxicidad ambiental y ocupacional. Por lo tanto, se recomienda reemplazar los solventes tóxicos con solventes de baja o nula toxicidad.
4	Diseño de productos más seguros	La toxicidad de los productos químicos diseñados es importante realizar su respectivo análisis. Deben presentar la menor

Número	Principio	Descripción del principio
5	Uso de disolventes más seguros.	toxicidad posible tratando de que cumpla las funciones. Debe evitarse el uso de disolventes como de otros reactivos. Cuando no sea posible, estas sustancias deben ser inocuas.
6	Energías eficientes	Reconocer el impacto ambiental y económicas de los requerimientos energéticos de los procesos químicos para ser minimizados. Si es posible, los métodos sintéticos deben ser llevados a cabo a temperaturas y presión ambiente.
7	Empleo de materias primas renovables.	Consumo materias primas que sean renovables en lugar de no renovables, siempre y cuando esta sea económica y técnicamente óptima.
8	Reducción de usos de derivados	Es importante evitar o minimizar los procesos que sean originarios de los derivados.
9	Catálisis	El uso de catalíticos para los reactivos da demostrado que son

Número	Principio	Descripción del principio
10	Diseño destinado para productos de degradación	mejores que el uso de reactivos estequiométricos. Para químicos es fundamental diseñar productos que al final de su función estos puedan desgradarse en productos inofensivos y que ya no existan en el medio ambiente.
11	Evaluación en tiempo real para la prevención de contaminación	Los métodos analíticos tienen que supervisarse en tiempo real para evitar la formación de sustancias peligrosas.
12	Prevención de accidentes	Tanto las sustancias como la forma en que se utilizan en un proceso químico deben elegirse considerando la minimización de accidentes potenciales, como fugas, explosiones e incendios, buscando una mayor seguridad laboral y ambiental.

Nota. En la tabla se muestran “Los 12 principios de la química verde propuestos por Paul Anastas y John Warner”. Tomado de (Marco et al., 2019)

Los Doce Principios de la Química Verde ayudaron a los profesionales de la química a identificar cuán cerca o lejos estaban sus protocolos del concepto de sustentabilidad, los procesos de la química verde incluyen casi todas las partes de la

química, como inorgánica, orgánica, bioquímica, polímeros, ambiental y toxicología, que permiten de mejor manera la producción de un producto.

Futuros retos de la Química Verde

Los desafíos futuros que enfrenta la química verde son tan diversos como la imaginación científica y abordan los más amplios temas de la sustentabilidad. De hecho, la Química Verde tiene como visión garantizar la preservación del medio ambiente y de la salud humana. Se sabe desde hace mucho tiempo que la conservación y el consumo de energía producen un efecto ambiental importante.

La química verde es un amplio campo de investigación que se encuentra influida de conocimiento de varias disciplinas como son la biotecnología y la tecnología química, ecología, la biología molecular y la toxicología. Los aportes de las diversas disciplinas pueden ayudar al desarrollo de tecnologías nuevas e innovadoras y rutas sintéticas verdes para la producción química. (Sri et al., 2021)

Plásticos

Los plásticos se usan ampliamente en una variedad de campos (por ejemplo, empaque, construcción, y transporte) porque son económicos, livianos y duraderos. Actualmente, son uno de los materiales más utilizados en el mundo. (Consultora, 2014)

Clasificación de los plásticos

Según (Scheirs & Kaminsky, 2006), los plásticos se pueden clasificar según varias consideraciones, por ejemplo:

- a) Composición química, esta se encuentra relacionada con la naturaleza de los monómeros. Por lo tanto, en este grupo los plásticos se subdividen en clases que son:

- Poliolefinas
- Polímeros vinílicos
- Estirénicos
- Poliamidas
- Poliésteres
- Resinas epoxy,
- Policarbonatos
- Poliuretanos, etc.

b) Estructura química como:

- Lineales (polietileno de alta densidad)
- Ramificados (polietileno de baja densidad)
- Reticulados y tridimensionales en red (termoestables, cauchos)

c) Rigidez como:

- Elástica
- Flexible
- Rígida

d) Tipo de aplicación:

- Materia prima frente a ingeniería
- Uso general frente a plásticos especiales;

e) Método de procesamiento utilizado

- Moldeo por inyección
- Extrusión
- Soplado de película
- Moldeo por soplado
- Termoformado
- Fundición
- Calandrado y muchas otras técnicas);

Propiedades de los plásticos

(Scheirs & Kaminsky, 2006) propone que, los plásticos también muestran algunas otras propiedades características como:

- Ser estructura amorfa, es decir, no cristalina que se relacionada con el desorden entre las cadenas poliméricas;
- Baja conductividad térmica;
- Alta resistencia eléctrica;
- Bajas temperaturas de reblandecimiento;
- Comportamiento viscoso-elástico.

Reciclaje de residuos plásticos

Según (Scheirs & Kaminsky, 2006), los residuos de plástico se obtienen de varias fuentes ya sea por consumo diario, conversión, producción etc. Los plásticos obtenidos después de ser consumidos son los más difíciles a la hora de identificar y separar de los demás desperdicios, debido a que el proceso de recolar es de alto costo y su adición de aditivos igual. Los tipos de reciclajes más utilizados son:

- Reciclaje de materias primas: obtención de mezclas importante como gas de síntesis o químicos.
- Reciclaje con uso térmico. su objetivo es recuperar el calor de combustión en el proceso.
- Reciclaje mecánico: reutilización de los plásticos en aplicaciones que sean similares.

Tereftalato de polietileno (PET)

Material plástico se utiliza intensivamente para el envasado de líquidos (botellas)/alimentos y para la producción de fibras textiles sintéticas, este se produce a partir de recursos de petróleo crudo (ácido tereftálico y etilenglicol) con tasas muy

crecientes que se prevé que excedan más de 70 millones de toneladas por año. El tereftalato de polietileno (PET) es el termoplástico transparente y semicristalino, más común de la familia del poliéster que tiene una gran rigidez, resistencia química y resistencia mecánica. Debido a sus excelentes propiedades de resistencia mecánica y química, se utiliza para fabricación de botellas de refrescos y/o agua, video y cintas de audio, fibras sintéticas, películas fotográficas, envases de alimentos, etc. (Moog et al., 2019)

En los últimos años, la biodegradación y la bioconversión de PET se han vuelto importantes para resolver la contaminación ambiental por plástico. Cada vez se han descubierto y modificado más hidrolasas de PET, que actúan principalmente sobre el enlace éster del PET y lo degradan. Los monómeros, TPA y EG pueden convirtiéndose en químicos de alto valor, y finalmente para la biodegradación y bioconversión de PET. (Qi et al., 2022)

Propiedades

Varias propiedades que (Aging et al., 2021) menciona del tereftalato de polietileno y por las cuales tales este tiene mayor uso a nivel industrial son:

- a) Resistencia a la abrasión,
- b) Estabilidad dimensional,
- c) Resistencia a la fluencia,
- d) Fácil procesamiento de detalles sus superficies,
- e) Alta resistencia al impacto incluso a bajas temperaturas ($< -70^{\circ}\text{C}$)
- f) Baja absorción de agua,
- g) Alta transparencia, aunque en ciertos casos se pueden involucrar con colorantes,
- h) Resistencia a productos químicos inorgánicos.

Propiedades obtenidas de (Crawford & Martin, 2020) se sabe que posee:

- i) Densidad 1360 (kg/m³)
- j) Resistencia a la tracción 75 (Mpa)
- k) Módulos de flexión 3 (Gpa)
- l) Porcentaje de alargamiento a la rotura 70%

Características

Según (Crawford & Martin, 2020), caracteriza al tereftalato de polietileno (PET), como un material naturalmente altamente cristalino y en esta forma (conocida como cPET) presenta propiedades de resistencia a la abrasión, tenacidad, resistencia, baja fricción, resistencia química y baja absorción de humedad. Tradicionalmente, su principal aplicación es como fibra textil (por ejemplo, Terylene). Posee una buena barrera de dióxido de carbono, así como también es aceptable a la humedad y oxígeno.

Mediante un enfriamiento rápido, se puede inducir al material a permanecer en un estado mayormente amorfo (conocido como aPET), donde conserva su transparencia y se mejora su procesabilidad. Durante los últimos años, esto se ha explotado para la fabricación de botellas de plástico, donde este aPET ha reemplazado enormemente al vidrio en la mayoría de las aplicaciones, el PET además es higroscópico y es recomendable que deba secarse antes del proceso de fusión. (Crawford & Martin, 2020).

Usos

El tereftalato de polietileno (PET) es considerado un polímeros termoplásticos más populares y el cual es principalmente usado para la producción de fibras para ropa, botellas y tanques, en muchas ocasiones también como material de construcción. El PET amorfo se utiliza para la producción de botellas y envases debido

a su alta transparencia, muy similar a la del vidrio. En otros casos, se utiliza un estado semicristalino de polímero, que tiene un color blanco lechoso y es opaco. (Aging et al., 2021)

PET es ampliamente utilizado en una variedad de industrias (máquina, electromecánica, automotriz y electrónico). Su alta resistencia a diversos factores ambientales derivada a la ausencia de sustancias nocivas de bajo peso molecular hace que sea ampliamente utilizado en aplicaciones que entra en contacto con alimentos (industria alimentaria como envases de alimentos, electrodomésticos). (Aging et al., 2021)

Biomasa

Inicios

La comunidad mundial del siglo XXI se enfrenta a desafíos derivados de un gran auge demográfico con un aumento de las actividades industriales y comerciales que se traducen en una gran demanda de energía, lo que provoca una mayor contaminación ambiental, agotamiento de los combustibles fósiles, el calentamiento global, así como el desperfecto de un estilo de vida saludable para los seres vivos. Esta crisis energética lleva hoy en día a la búsqueda de fuentes alternativas de generación de energía para atender de manera sostenible la demanda energética mundial. (Azeta et al., 2021)

Definición

Los investigadores han identificado la biomasa como una fuente de energía sostenible, renovable y ecológica. La biomasa constituye alrededor del 12,83 % de las existencias de energía renovable para el medio ambiente, y se espera que su utilización se prolongue durante las próximas décadas, se sabe que la generación de grandes cantidades de biomasa se debe a partir del cultivo, el consumo de productos

agrícolas, la cosecha como del procesamiento de este. Estos residuos constituyen desechos, considerándose los vertederos como el medio viable de tratamiento. Los residuos vegetales como el banano, plátano, cáscaras de frutas, coco, etc., son adecuados para procesos termoquímicos.(Azeta et al., 2021)

Debido a la heterogeneidad de los materiales, el uso y el origen, la definición de biomasa varía. Sin embargo, de manera más general, la biomasa es una combinación de materiales de origen natural, ya que suelen provenir de plantas (contienen: celulosa, hemicelulosa y lignina) como arbustos, algas, árboles, cultivos, así como todos los materiales compuestos de matriz orgánica, excepto los plásticos provenientes de materiales petroquímicos y fósiles.

Es el material más abundante y renovable para la producción de biocombustibles a nivel mundial, con alrededor de 100 mil millones de toneladas de producción de biomasa por año. La biomasa es neutra en carbono y tiene bajas emisiones de GEI debido al menor contenido de nitrógeno y azufre que el carbón o el petróleo. La biomasa reemplaza potencialmente a los combustibles fósiles de manera sustancial, al disminuir impacto ambiental puede convertirse en energía eléctrica o térmica o utilizarse como combustible para el transporte(Azeta et al., 2021)

Composición de la biomasa

La composición de la biomasa es muy diversa. Por ejemplo, los residuos de origen vegetal se componen principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina en porcentajes variables dependiendo a su clase.

(Gusiatin, 2016) distingue tres tipos principales de materia en la biomasa, es decir, orgánica, inorgánica y fluida. Cada uno de ellos plantea un estado específico y tipo de constituyentes.

- La materia orgánica contiene componentes sólidos no cristalinos (celulosa, hemicelulosas, lignina, extractivos) y componentes sólidos cristalinos (minerales orgánicos como Ca, Mg, K, Na). Un dato importante es que Los biocombustibles y bioquímicos lignocelulósicos son combustibles y productos químicos como el etanol o los hidrocarburos producidos a partir de fibras estructuradas de plantas que presenten en su estructura celulosa, hemicelulosa y polímeros de lignina.
- Por otro lado, la materia inorgánica se compone de componentes sólidos cristalinos, ejemplo de este son los fosfatos, carbonatos, silicatos, cloruros, etc.; componentes sólidos semicristalinos como los silicatos poco cristalizados, hidróxidos, etc. y componentes sólidos amorfos.
- La materia fluida incluye por lo contrario la humedad y los gases.

Composición estructural de algunas biomosas

En la **Tabla 2** que se encuentra a continuación muestra la composición estructural de ciertas biomosas lignocelulósicas de las que presentan mayor cantidad de residuos en el Ecuador, esta composición es útil para los análisis químicos y bioquímicos, en el momento de buscar su aprovechamiento.

Tabla 2

Fracción lignocelulósica de varios tipos de biomasa.

Clase de Biomasa	Clase de Biomasa lignocelulósica	Lignina	Hemicelulosa	Celulosa
Sector	Palma africana	29,2	21,6	23,7
Agrícola	Banana	17±0,3	25,8±0,9	26,7±0,9
	Arroz			

Clase de Biomasa	Clase de Biomasa lignocelulósica	Lignina	Hemicelulosa	Celulosa
Sector	Cascara de arroz	14,3	24,3	31,3
	Paja de arroz	13,6	22,7	37
	Cacao	14,6-26,38	8,72-11,0	24,24-35,0

Nota. Datos obtenidos del artículo “Experimental investigation of thermal properties of lignocellulosic biomass: A review”. Tomado de (Obafemi et al., 2018)

Propiedades de la Biomasa

Según (Sánchez et al., 2019), las fuentes de donde provienen son aspectos importantes para determinar las propiedades de la biomasa, para determinar si esta puede ser usada para la generación de energía, ya que de esta forma se conocerá la elección del proceso de conversión y cualquier dificultad presentada durante su procesamiento, por lo tanto, se mencionan seis importantes propiedades inherentes, tal es el caso:

- Relación de carbón fijo y volátil
- Contenido de humedad
- Valor calorífico
- Cantidad residuos de cenizas
- Contenido de metales alcalinos
- Proporción de celulosa/lignina

Clasificación de la Biomasa

La categorización según la fuente es importante para diseñar sistemas de uso de la biomasa, varias de las fuentes de biomasa suelen ser: la agricultura (cultivos), la

silvicultura (madera) y los residuos (municipal, agrícola, forestal e industrial). Una amplia gama de materias primas sostenibles está potencialmente disponible para la producción de biocombustibles y biogás. (Gusiatin, 2016).

(Gusiatin, 2016), menciona la clasificación de la biomasa en términos de su uso y aplicación como son:

- Recurso de biomasa convencional: en el sector de pesca, materiales alimentarios, astillas, agricultura, silvicultura (leñosa), ganadería, pulpa, etc.;
- Residuos de biomasa (derivados): residuos agrícolas, forestales, ganaderos, aserrín, lodos de depuradora, licor negro;
- Biomasa de plantación: forestal obtenidas del eucalipto, palma de aceite, álamo, sauce, herbácea como de la caña de azúcar, pasto varilla, sorgo, etc. Y por último de acuática como las alga gigante, jacinto de agua, etc.

Biomasa como oportunidad potencial fuente de energía

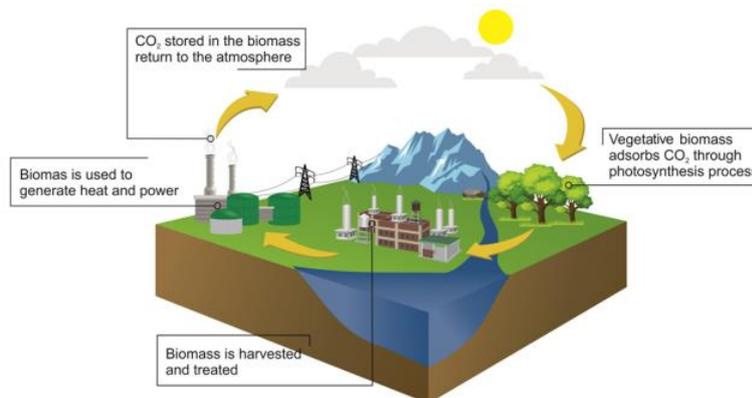
La biomasa ha sido en la actualidad parte indispensable de los debates energéticos dentro del contexto político, fuertemente anhelado por la Unión Europea, que ha sabido transformar las disposiciones de ahorro y protección ambiental en planes estratégicos de ejecución para el desarrollo, para el buen vivir de las futuras generaciones. (Tursi, 2019)

De hecho, la biomasa podría desempeñar un papel importante como fuente de energía renovable con un enorme potencial en la producción de biocombustibles para transporte, electricidad y calor. Cabe señalar que la biomasa es un recurso energético completamente renovable, ya que el CO_2 que se libera a través de sus procesos de combustión y su aprovechamiento no provoca un aumento del dióxido de carbono atmosférico al ser de origen biogénico, en pocas palabras este proceso tiene un menor índice de contaminación. Las plantas utilizan el CO_2 , liberado al medio ambiente como

consecuencia de los procesos de degradación de las demás plantas, para su crecimiento y para sus procesos metabólicos, como se muestra en la **Figura 1**.(Tursi, 2019)

Figura 1

Ciclo del carbono a lo largo de la producción y utilización de la biomasa.



Nota. La imagen muestra el ciclo que realiza el carbono a los largo de la producción y utilización de la biomasa, tomado de A review on biomass: importance, chemistry, classification, and conversion (Tursi, 2019)

Nuestro planeta almacena una gran cantidad de biomasa disponible en diferentes áreas que van desde los bosques hasta los océanos. Varios estudios demuestran que las reservas terrestres y acuáticas de biomasa total del mundo se encuentran en un estimado de 1,8 billones de toneladas y 4 mil millones de toneladas, respectivamente. Desde un punto de vista energético, la biomasa total en el mundo podría tener la capacidad de producción potencial de 33.000 exajulio (EJ); correspondiente a más de 80 veces el consumo anual de energía en el mundo, energía que podría ser aprovechada grandemente. (Tursi, 2019)

Biomasa en el Ecuador

La biomasa es considerada como una fuente de energía la cual puede ser renovable, originaria de residuos de la materia orgánica reemplazando a los recursos

no renovables como el crudo de petróleo. Según los datos proporcionados por (Consultora, 2014) los residuos con mayor cantidad según su sector son:

- Sector Agrícola
 - Palma africana: 6.872.462,27 t (residuos/año)
 - Banana: 4.926.095,60 t (residuos/año)
 - Arroz: 2.106.695,86 t (residuos/año)
 - Cacao: 2.015.352,60 t (residuos/año)
- Sector Pecuario
 - Vacuno leche 857.413,15 t (residuos/año)
- Sector forestal
 - Forestal 216.157,13 t (residuos/año)

Procesos de transformación para la biomasa

En la actualidad, existen varios procesos termoquímicos y químicos de conversión de biomasa en biocombustibles, gasificación, pirólisis, síntesis de Fischer-Tropsch y producción de biodiesel, y procesos bioquímicos como la producción de bioetanol. Sin embargo, las rutas de conversión de biomasa en cada proceso dependen de su tipo y características. Generalmente, la biomasa se caracteriza por una composición compleja.

Procesos Termoquímicos. Es importante tener la biomasa seca ya que el contenido de agua imposibilita la valoración energética que se necesita; estos procesos se realizan a condiciones determinadas ya sea de presión y temperatura, permitiendo que la biomasa se transforme en otros subproductos de mayor valor agregado como sólidos, líquidos y gaseosos, es relevante considerar que sus mayores productos son gaseosos; las tecnologías de conversión termoquímica pueden utilizar

los tres componentes poliméricos de la materia prima de biomasa, los procesos termoquímicos son:

- **Combustión**

La reacción de combustión es una reacción de oxidación en exceso de aire u oxígeno que permite la generación de calor, esta forma es la más antigua como común que usan para el aprovechamiento de energía desde años atrás, estos sistemas generan calor que lo usan posteriormente para cocción de alimentos, calefacción, así como también para el secado de productos agrícolas en el campo. En el ámbito industrial el calor puede ser usado para la generación de electricidad y en la producción de vapor, equipos más avanzados como un lecho fluidizado, pueden ser usados para este fin industrialmente. (Consultora, 2014)

- **Gasificación**

Este proceso consisten por el contrario de la ruptura térmica de la biomasa en gases combustibles de, carbón, cenizas y gases volátiles en un reactor cerrado, este es un proceso endotérmico el cual consta de dos etapas; la primera los componentes volátiles pertenecientes al combustible son vaporizados a temperaturas $> 600^{\circ}\text{C}$, dentro de estos vapores se localizan hidrocarburos, CO , CO_2 , vapor de agua y residuos de la pirólisis de los compuestos orgánicos}, la segunda etapa se encarga de gasificar el carbón a través de reacciones que interviene el oxígeno, vapor de agua, hidrógeno y monóxido de carbono. El calor que necesita es proveniente de la combustión del combustible, gases o carbón. La segunda etapa es muy importante ya que produce syngas (gas de síntesis). (Consultora, 2014)

Los principales procesos secuenciales que abarcan la conversión termoquímica de la biomasa son, por lo tanto: (1) pirólisis, calentamiento en ausencia de oxígeno; (2) gasificación, calentamiento en condiciones de oxígeno parcial; y (3) combustión, el calentamiento en ambiente con exceso de oxígeno. Si el calentamiento se realiza en un ambiente solvente, se denomina (4) licuefacción solvente o licuefacción hidrotermal si dicho solvente es agua.

Procesos Químicos y Bioquímicos. Estos procesos involucran a la biomasa en forma húmeda, por lo general estos procesos bioquímicos ocurren a temperaturas ambientales.

- **Fermentación alcohólica**

El principal compuesto obtenido de este proceso es el bioetanol, el 60% de este proceso es usado para la elaboración de biocombustibles y cierto porcentaje es destinado para la industria y la elaboración de bebidas. Se puede decir que es considerado como un recurso sustentable, con un alto poder calorífico, de baja densidad y respecto a los costos de producción y transporte son significativamente bajos. La levadura o las bacterias pueden realizar la fermentación de azúcares simples, como la glucosa, para formar alcoholes, como el etanol, junto con la liberación de CO_2 . (Consultora, 2014)

- **Transesterificación y Esterificación**

La esterificación es el proceso más sencillo para simular las propiedades de un aceite a las de un diésel- oil, por lo contrario, la transesterificación es proceso químico el cual combina el alcohol ya sea metanol u etanol, con el objetivo de producir esteres grasos. Estos pueden ser usados como combustible para motores comunes de autos o también ser mezclados con diésel. (Consultora, 2014)

- **Digestión anaeróbica**

Los residuos orgánicos húmedos que son sometidos a fermentación permiten la generación de biogás, esta materia se descompone en una ausencia de oxígeno dando lugar a productos como biogás, biosol y biol.

Pirólisis

Definición

La pirólisis es un proceso termoquímico que se utiliza principalmente como proceso de pretratamiento para la recuperación de material de las placas de circuito impreso. La pirólisis también se puede utilizar en la conversión de plásticos recuperados. El producto principal es el piroaceite y el pirocarbón. Este proceso es muy eficiente cuando se trata de conversión de plásticos en otros recursos, y tiene una baja huella ambiental en comparación con la combustión y los vertederos. (Sadhan Kumar, 2020)

La pirólisis implica la descomposición del combustible sólido en gases de hidrocarburos más ligeros volátiles compuestos como CO , H_2 , CH_4 , etc., carbón y alquitrán es la materia volátil no convertida hecha de hidrocarburos que presenta un alto peso molecular en ausencia de aire. Dado que los plásticos contienen una cantidad significativa de volátiles, se podría esperar que los productos de pirólisis se compongan principalmente de gases ligeros como CO , CH_4 , H_2 y char (carbono), independientemente del tipo de monómero. (Kannan et al., 2013)

Para lograr un combustible limpio a partir del pirólisis, es importante tener un paso de pretratamiento. Estos pueden llevarse a cabo en tres vías diferentes:

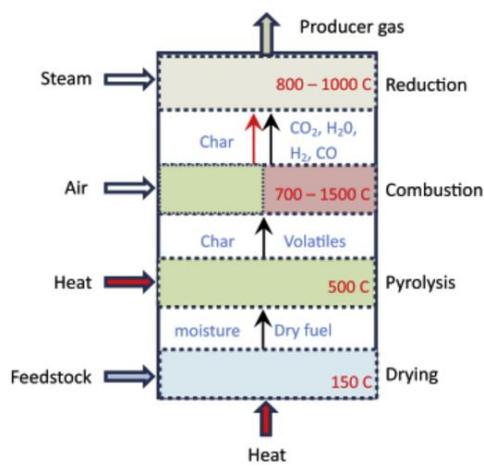
- a) Deshalogenación por pretratamiento (tratamiento mecánico-químico o hidrotérmico) seguido de termólisis;

- b) Deshalogenación in situ durante la termólisis mediante el uso de catalizadores o adsorbentes
- c) Deshalogenación ex situ, es decir, termólisis seguida de un refinado adicional

En base a los estudios realizados por (Kannan et al., 2013) en donde menciona las condiciones cercanas de los procesos de gasificación y pirólisis, cuando se tiene como materia prima biomasa y/o plástico; en la **Figura 2** muestra como la temperatura de secado se encuentra alrededor de los 150°C, por ello que el secado es un proceso muy rápido y esencialmente se completa incluso antes de que la temperatura alcance los 250-300 °C. Además, los plásticos no contienen humedad significativa y se espera que la poca cantidad presente se libere por completo antes de los 150 °C.

Figura 2

Pasos involucrados en un proceso típico de gasificación.



Nota. Obtenida de “Energy recovery from co-gasification of waste polyethylene and polyethylene terephthalate blends”. Tomado de (Kannan et al., 2013)

Copirólisis

La Copirólisis es un proceso que involucra dos o más materiales diferentes como materia prima. La copirólisis con catalizadores y adsorbentes pueden mejorar la calidad del producto deseado como por ejemplo piro aceite. (Sadhan Kumar, 2020)

De acuerdo con (Abnisa et al., 2014), la copirólisis es una tecnología potencial para la industrialización ya que tiene una atractiva relación rendimiento/costo. La clave aquí es el efecto sinérgico que se desarrolla debido a las reacciones de diferentes materiales durante la pirólisis.

Además, el principal beneficio de usar el método de copirólisis es el hecho de que el volumen de desechos se puede reducir significativamente a medida que se consumen más desechos como materia prima. También tiene los beneficios tratar de reducir los vertederos necesarios, resolver una serie de problemas ambientales y ahorrar costos para el tratamiento de desechos. Dado que la eliminación de residuos en vertederos no es deseable, este método podría proponerse como un procedimiento de gestión de residuos alternativo para el futuro que tendrá un impacto significativo en la reducción de residuos y puede mejorar la seguridad energética. (Abnisa et al., 2014)

Además, desde un punto de vista económico, se ha encontrado que la copirólisis sea una opción prometedora para una técnica de conversión de biomasa como se observa en la **Figura 3**, para producir aceite de pirólisis en conclusión las consecuencias económicas de los efectos sinérgicos usando las técnicas de copirólisis es más rentable que la pirólisis de biomasa sola y que también tiene potencial de desarrollo comercial. (Abnisa et al., 2014)

altamente selectivas de una gama enorme de productos químicos y combustibles, y como fuente de hidrógeno puro y monóxido de carbono. El gas de síntesis también conocido syngas está actualmente jugando un papel cada vez mayor en la conversión de energía. Esta se puede denominar en dos categorías gas de síntesis rica o pobre según la composición de sus componentes principales.

- Gas de síntesis rico en Hidrógeno

Caso de estudio: Nanda exploró la conversión hidrotermal de desechos de frutas y residuos agroalimentarios en SCW para producir gas de síntesis rico en H₂. Los residuos alimentarios estudiados incluyeron cáscara de coco, cáscara de piña, cáscara de limón, cáscara de naranja, cáscara de plátano, cáscara de aloe vera y bagazo de caña de azúcar. El proceso de gasificación hidrotermal se llevó a cabo a ciertas condiciones de temperatura, presiones y tiempo de reacción, catalizador. Entre los desechos de frutas y residuos agroalimentarios estudiados, la cáscara de coco en presencia de 2% en peso de K₂CO₃ exhibió el mayor rendimiento de H₂, selectividad de H₂ y rendimiento total de gas de 4,8 mmol/g, 45,8% y 15 mmol/g, respectivamente. (Okolie et al., 2020)

- Gas de síntesis pobre en Hidrógeno

El uso de un gas de síntesis pobre en hidrógeno rico en CO derivado de la gasificación del carbón se adapta mejor a una configuración CSTR.

Actualmente, la producción de hidrógeno por pirólisis de biomasa está recibiendo atención de la investigación como una alternativa plausible para la producción de hidrógeno a partir de biomasa. Aunque uno de los principales productos de la pirólisis de biomasa es el bioaceite, el aceite a su vez se puede reformar en un rango de temperatura de 450 a 850 °C para producir gas de síntesis rico en hidrógeno. (Ayodele et al., 2019)

Tecnología y producción de gas de síntesis

El proceso de generación de gas de síntesis es un proceso no catalítico para producir principalmente hidrógeno y monóxido de carbono, con el objetivo de realizar la producción final de hidrógeno de alta pureza a partir de derivados de hidrocarburos gaseosos o líquidos. En este proceso, una mezcla controlada de materia prima precalentada y el oxígeno se alimenta a la parte superior del generador donde el monóxido de carbono y el hidrógeno emergen como productos. (Ayodele et al., 2019)

El proceso de gasificación es un proceso que convierte las materias primas orgánicas (carbonáceas) en monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrógeno al hacer reaccionar la materia prima a altas temperaturas ($>700^{\circ}\text{C}$, 1290°F), sin combustión, con una cantidad controlada de oxígeno y/o vapor. (Ayodele et al., 2019)

Materia prima para obtención. La tecnología de gasificación ofrece la importante capacidad de tomar una amplia gama de materias primas y procesarlas en gas de síntesis, a partir del cual es posible obtener una cantidad igualmente diversa de productos finales. De hecho, la tecnología ha avanzado hasta tal punto que los gasificadores se han desarrollado para adaptarse a todos los diferentes tipos de materiales carbonosos anteriormente mencionados, como productos altamente carbonosos de la refinación de petróleo crudo, como residuos de petróleo crudo, petróleo crudo pesado, betún de arena bituminosa y en muchos casos del coque de procesos térmicos y biomasa, así como diversos tipos de residuos como residuos agrícolas, residuos industriales y residuos municipales.

Diseño de procesos

Todo diseño comienza con una necesidad percibida por el público. En el diseño de un producto o proceso químico, deriva de acuerdo con la fatalidad que la sociedad

presenta de un determinado producto, creando una oportunidad comercial, según lo previsto por la organización de ventas y marketing. Antes de comenzar el trabajo, el diseñador tiene la obligación de obtener una declaración completa y sin ambigüedades de los requisitos como sea posible. (Towler & Sinnott, 2021)

Es importante distinguir entre las necesidades que son "imprescindibles" y las que son "deberían tener". Los "debería tener" son aquellas partes de la especificación inicial que pueden considerarse deseables pero que pueden relajarse no es una obligatorio, si es necesario a medida que se desarrolla el diseño. Es importante que el ingeniero de diseño trabaje en estrecha colaboración con el departamento de ventas o marketing o directamente con el cliente para tener una brecha directa la necesidad del cliente lo más claro posible. (Towler & Sinnott, 2021)

En la práctica, el primer paso del diseñador es la recopilación de información y documentos previos sobre proyectos de diseño similares. Se analizan posteriormente el éxito de la implementación, las limitaciones y el rendimiento de estos. Las alternativas de diseño que surgen de este paso son casi siempre las versiones mejoradas de los diseños propuestos anteriores y la experiencia del diseñador es un factor importante al momento de realizar dicho proyecto. (Ray & Das, 2020)

Según (Ray & Das, 2020), la selección de la solución de diseño generalmente se basa en consideraciones cualitativas seguidas de consideraciones cuantitativas.

Las consideraciones cualitativas pueden ser:

- Solidez del concepto científico.
- Riesgo de incendio y seguridad de los equipos de la planta, la mano de obra involucrada y el área circundante.
- Viabilidad de la implementación práctica, esto incluye la compatibilidad con los componentes existentes de una planta.

- Atractivo económico o ventaja de una opción sobre otra(s).
- Requerimiento de instalaciones auxiliares como servicios públicos y sus niveles.
- Eliminación de desechos/consideraciones ambientales.
- Facilidad de operación, mantenimiento, montaje, puesta en marcha.
- Disponibilidad de recursos de tecnología, materiales, mano de obra y habilidades para el montaje, puesta en marcha, operación y mantenimiento.
- Tiempo para finalización del proyecto.
- Se prefieren los diseños que presenten implementación y rendimiento probados
- Financiamiento del proyecto: Capital disponible en cantidad y su disposición en una escala de tiempo.

Limitaciones que influyen al diseño de procesos

Según (Towler & Sinnott, 2021) el paso más importante al iniciar el diseño de un proceso es conocer en forma clara y precisa la necesidad del cliente en una base del diseño. La base del diseño es una declaración más precisa del problema a resolver. Normalmente incluirá la tasa de producción y las especificaciones de pureza del producto principal, junto con información sobre las limitaciones que influirán en el diseño, como:

- a. El sistema de unidades a utilizar.
- b. Los códigos de diseño nacionales, locales o de la empresa que deben conseguir paso a paso.
- c. Detalle de las materias primas que están disponibles.
- d. Información sobre sitios potenciales donde podría ubicarse la planta, incluidos datos climáticos, condiciones sísmicas y disponibilidad de infraestructura.

- e. Información sobre las condiciones, disponibilidad y precio de los servicios públicos, como aire de proceso, gas combustible, vapor, agua de refrigeración, agua de proceso y electricidad que se necesitarán para ejecutar el proceso en la planta.

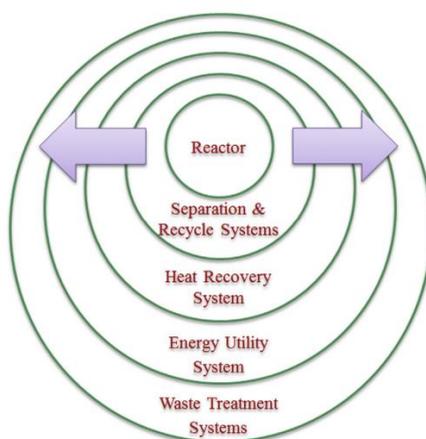
La base del diseño debe estar claramente definida antes de que pueda comenzar el diseño. Si el diseño se lleva a cabo para un cliente, la base del diseño debe entrevistarse con el cliente al comienzo del proyecto para tener una visión precisa del requerimiento que el cliente presenta. La mayoría de las empresas utilizan formularios o cuestionarios estándar para capturar la información básica del diseño.

Síntesis de proceso

El proceso de diseño tradicional comprende una jerarquía de actividades como se observa en la **Figura 4.**, que puede representarse mediante las capas sucesivas de un diagrama de cebolla.

Figura 4

Diagrama de Cebolla.



Nota. Diagrama de cebolla de las etapas del diseño de síntesis de proceso “Chemical Engineering Process Simulation”. Tomado de (Foo & Elyas, 2017)

El desarrollo comienza con el Reactor químico (R), luego continúa con el sistema de Separaciones (S). Luego, el diseño aborda las capas de Intercambio de calor (H) y Utilidad (U). Idealmente, la solución del problema de diseño debería ser global, ya que no es posible una separación completa de las actividades anteriores.(Boakye, 2014)

Simulación de procesos

La simulación es un proceso de diseño de un modelo operativo de un sistema determinado y la realización de experimentos con este modelo con el fin de comprender el comportamiento del sistema o de evaluar estrategias alternativas que permitan el desarrollo o la operación del sistema. Toda simulación tiene que ser capaz de reproducir aspectos seleccionados del comportamiento del sistema modelado con un grado aceptado de precisión.(Boakye, 2014)

Un modelo de simulación sirve para realizar "experimentos virtuales" de un caso real. Casi invisible en la mayoría de los casos, al estar incorporado en la tecnología del software, el modelado es la característica clave en la realización de una simulación. Es importante tener en cuenta que la simulación es solo una representación aproximada de la realidad, con un cierto nivel de precisión, y no la realidad misma. Es por tal motivo que el usuario siempre debe poder evaluar la confiabilidad de los resultados entregados por un simulador. (Boakye, 2014)

La simulación de procesos como también la síntesis de procesos son dos pasos importantes e interrelacionados para el diseño de los procesos químicos, que son usados para lograr un diseño de procesos eficaces. El objetivo de la simulación de procesos es predecir cómo se comportaría realmente un proceso definido en un conjunto determinado de condiciones de funcionamiento. (Foo & Elyas, 2017)

Simulación de procesos químicos. La simulación por computadora para la elaboración de nuevos productos químicos está involucrada en todas las etapas de un proyecto, desde estudios de factibilidad, pasando por el diseño conceptual, la ingeniería de detalle y, finalmente, la operación de la planta dando a la industria o al diseñador una amplia información del proyecto antes de su puesta en marcha. La simulación de procesos de ingeniería química es ideal para estudiantes, investigadores principiantes y profesionales, ya que lo guía a través de procesos químicos y operaciones unitarias así mismo con la facilidad del uso de principales softwares de simulación que se utilizan en el sector industrial.(Foo & Elyas, 2017)

Simulador Aspen PLUS. Aspen Plus se basa en técnicas para desarrollar diagramas de flujo que utilizaron los ingenieros químicos hace muchos años. Los programas de computadora recién comenzaban a usarse para una variedad independiente y generalmente se usaban para diseñar unidades individuales. Aspen Plus, aunque sigue siendo básicamente un simulador modular secuencial, ha crecido considerablemente y tiene muchas oportunidades avanzadas con enlaces a software especializado, como para el diseño detallado de intercambiadores de calor, modelado de procesos por lotes, simulación dinámica, estimación de costos y otros. También tiene una facilidad para usar un enfoque basado en ecuaciones matemáticas en algunos de sus modelos que permite la resolución de problemas con especificaciones estrictas.(Schefflan, 2016)

Una simulación de diagrama de flujo es un software de computadora que se utiliza para modelar de forma cuantitativa una planta de procesamiento químico determinada que, además de la unidad del reactor, también incluye pasos de tratamiento previo y posterior con el uso de más unidades de operación. Por lo tanto, la simulación de un proceso químico completo, desde la materia prima hasta el producto terminado final, se representa simbólicamente mediante diferentes íconos

donde cada ícono representa una operación unitaria, flujo de material de entrada/salida, proceso químico y flujo de energía de entrada/salida. (Al-Malah, 2017)

Un proceso físico viene mediante un conjunto de ecuaciones algebraicas/diferenciales linealmente independientes que se dirigen a un estado de realidad, de modo que el número de ecuaciones escritas deberían ser iguales al número de variables o cantidades desconocidas, así como también el proceso físico como tal están especificados o descritos por una representación matemática equivalente. En general, escribir tales ecuaciones se deriva de las siguientes condiciones:

- Ecuaciones de balance de extensas propiedades termodinámicas, como masa, mol y energía;
- Relaciones termodinámicas para medios reactivos y no reactivos, como el equilibrio químico y de fases;
- Correlaciones de velocidad para la transferencia de cantidad de movimiento, calor y masa;
- Estequiometría de reacción y datos cinéticos;
- Restricciones físicas impuestas al proceso.

Según (Al-Malah, 2017), ya con datos termodinámicos confiables, condiciones operativas sensibles y modelos rigurosos de cada uno de los equipos usados en los procesos de simulación, Aspen Plus puede simular el comportamiento real de una planta. La simulación de diagrama de flujo de Aspen Plus nos permite ejecutar muchas tareas, como:

- Realizar pruebas de "qué pasaría si";
- Verificaciones de especificaciones de diseño (configuración de la planta);

- Llevar a cabo estudios de “eliminación de cuellos de botella de partes constrictivas de un proceso”;
- Realizar análisis de sensibilidad;
- Ejecutar investigaciones de optimización

Clasificación para selección de Componentes

Componentes puros

Los componentes puros por lo general son los compuestos orgánicos, sin embargo, también toman encuentra a los compuestos electrolíticos e inorgánicos. (Becker et al., 2015)

Pseudocomponentes

Estos componentes son aquellos que el ingeniero de diseño los dibuja en el programa u otro simulador, estos modelos son muy usados para el fraccionamiento de productos mezclados, así como para el campo del petróleo, se utiliza también para caracterizar material pesado en procesos de craqueo de etano. Los pseudocomponentes se los toman como inertes en la mayoría de los procesos químicos. (Becker et al., 2015)

Sólidos y sales

Según (Becker et al., 2015), menciona que la mayoría de los procesos industriales ya sea en la química o farmacéutica, utilizan componentes en estado sólido, algunos de estos pueden caracterizarse como componentes puros y pueden relacionarse con otros simultáneamente mediante reacciones o equilibrios de fase. Las células y catalizadores, por lo contrario, es difícil equilibrarlos con otros componentes. El programa ASPEN PLUS, divide a los componentes sólidos como:

- Componentes puros aquellos que sus propiedades son medibles, llamados también como sólidos convencionales, estos pueden ser involucrados en cualquier reacción específica en una operación unitaria, así como también pueden participar en los equilibrios de fase.
- Si un sólido participa solo en el equilibrio de una reacción y no en la de equilibrio de fases se lo conoce como un sólido inerte convencional (CISOLID).
- Un sólido no convencional es aquellos que no se encuentran involucrados en un equilibrio de fase o equilibrio de reacción, estos por lo general se los caracteriza por sus atributos que por sus propiedades moleculares y se pueden usar para varios campos.

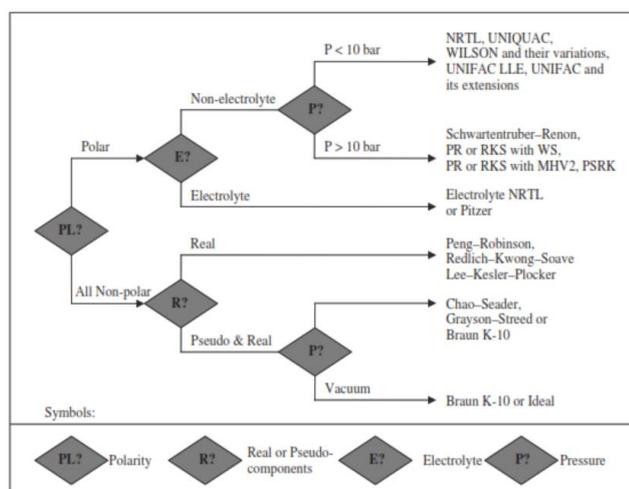
Paquetes termodinámicos

El diseño de productos químicos y bioquímicos y algunos otros campos, por ejemplo. ciencia materiales y evaluación ambiental, a menudo requieren datos termodinámicos, especialmente fase equilibrios para su comprensión.

Las industrias petrolera, así como la química han sido durante muchos años los usuarios tradicionales de datos termodinámicos ya les permite obtener varios datos importantes de los productos químicos, aunque los sectores industriales de polímeros, farmacéuticos y otros están haciendo uso hoy en día de herramientas termodinámicas. Además, los datos termodinámicos son importantes para el diseño de productos y ciertas aplicaciones en el campo ambiental, por ejemplo, para la estimación de la distribución de sustancias químicas en los ecosistemas ambientales. Es necesario recalcar que varios simuladores comerciales ya tienen un amplio espectro de modelos termodinámicos para elegir y las empresas a menudo usan los llamados "árboles de decisión o selección", como se observa en la **Figura 5**, para seleccionar modelos adecuados para aplicaciones específicas.(Kontogeorgis & Folas, 2009)

Figura 5

Árbol de decisión o selección de paquete termodinámico.



Nota. Obtenido de “Thermodynamic Models for Industrial Applications From Classical and Advanced Mixing Rules to Association Theories”. Tomado de (Kontogeorgis & Folas, 2009)

Diagrama de procesos

Las industrias que realizan procesos químicos tienen como objetivo la producción de una amplia variedad de productos que satisfacen las necesidades de las personas en general, estos procesos involucran cierta información importante como sustancias, condiciones de procesos, entre otras. La información visual hoy en día se ha considerado como la forma óptima de presentar un material de proyecto y que evita malinterpretaciones, aun si la persona que lo revisa no estudie el campo. Por estas razones, es esencial que los ingenieros químicos, industriales, petroquímicos, puedan diseñar diagramas de proceso apropiados y sean hábiles así mismo para analizar e interpretar diagramas desarrollados por otros ingenieros. (Turton et al., 2009)

Según (Turton et al., 2009), los diagramas técnicos comúnmente utilizados por los ingenieros químicos, industriales y petroquímicos son los diagramas de tuberías e

instrumentación (P&ID), diagrama de flujo de bloques (BFD) y por último el diagrama de flujo de proceso (PFD).

Diagrama de flujo de bloques (BFD)

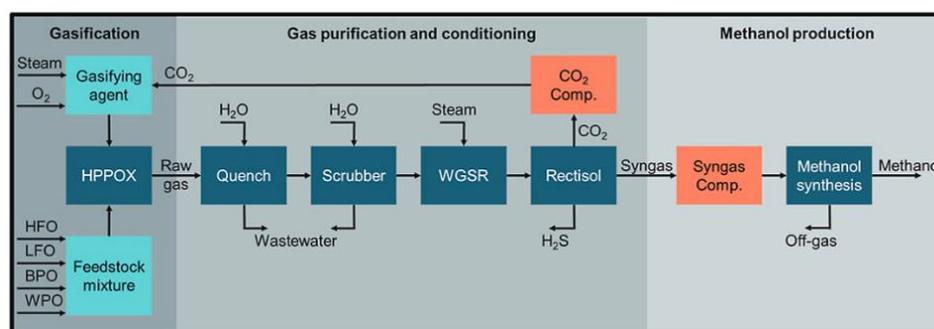
Según (Turton et al., 2009), cita que los diagramas de flujos de bloques para proyectos son estudiados al iniciar los estudios de ingeniería, en donde se realiza los balances de materia y energía. En este diagrama se puede incluir información como condiciones de temperatura, presiones, conversiones y rendimientos de cada caudal, así como algunas composiciones químicas. (Turton et al., 2009)

Un ejemplo del diagrama de flujo de bloques (BFD), se pueden observar en la

Figura 6.

Figura 6

Proceso de obtención de Metanol.



Nota. Imagen adaptado de la investigación, "Integrating biomass and waste into high-pressure partial oxidation processes: Thermochemical and economic multi-objective optimization". Tomado de (Rößger et al., 2022)

Diagrama de flujo de procesos (PFD)

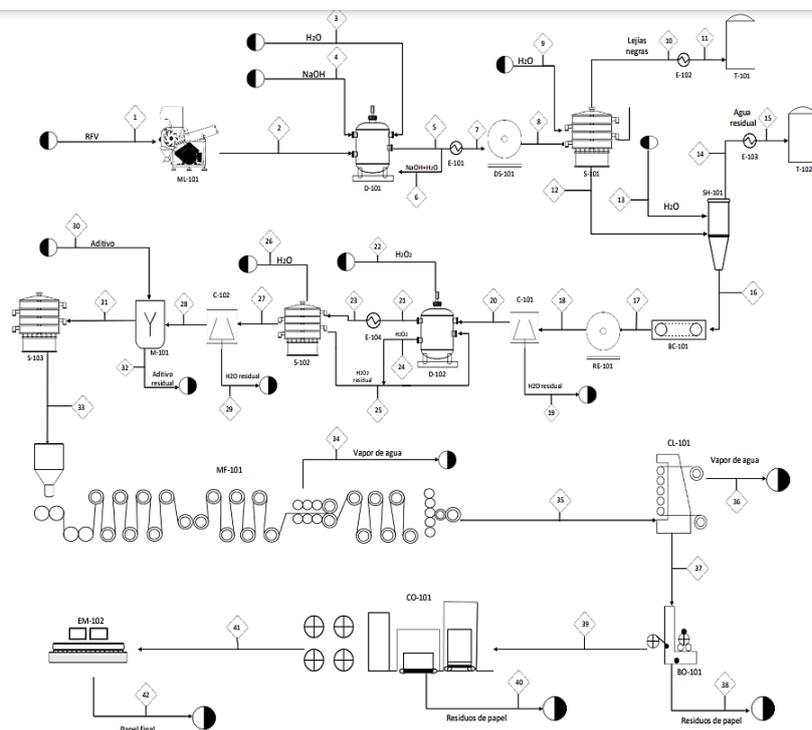
Según (Turton et al., 2009), el diagrama (PFD) contiene toda la información necesaria de ingeniería química para el diseño de un proceso químico. Un diagrama de flujo de procesos industrial típico presentara la siguiente información.

1. Los equipos principales del proceso junto con su descripción, el equipo como las corrientes flujos se entran asignadas un número y nombres descriptivo.
2. Se debe añadir una descripción de las condiciones que el proceso presenta, así como la la composición química de cada corriente. Estos datos pueden adjuntarse en una tabla de datos.

Un ejemplo de ello se puede observar en la **Figura 7**, donde se muestra el proceso de un diseño de proceso para la fabricación de papel.

Figura 7

Ejemplo diagrama de flujo de procesos (PFD).



Nota. Diagrama de flujo de procesos obtenida de “Diseño de un proceso de producción de papel mediante el aprovechamiento de los residuos de racimos de frutos vacíos de la palma africana *elaeis Guineensis*”. Tomado de (Cobo, 2022)

Análisis próximos, últimos y de azufre

Según (Miranda et al., 2019), Aspen Plus utiliza atributos de componentes para representar componentes no convencionales y calcular sus propiedades físicas como la densidad y la entalpía. Dependiendo del tipo de método elegido, requiere análisis próximo (PROXANAL), último análisis (ULTANAL) y análisis de azufre (SULFANAL).

- **Ultanal:** análisis ultimo o análisis elemental % en peso de una base seca, en esta se establece los valores de ceniza, carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre de la materia prima.
- **Sulfanal:** llena el espacio para valores piríticos, sulfatados y orgánicos, pero es posible completar solo el contenido general de azufre
- **Proxanal:** El análisis de próximos conocidos como PROXANAL solicita incluir los valores (en % en peso en base seca) de humedad, carbono fijo, materia volátil y cenizas.

Es importante saber que estos análisis ultimo al sumarse debe cumplir el 100%, así como también, el parámetro de humedad define que cantidad de agua existe en el material.

Modelos de experimentación

Modelo Cinético

Los modelos cinéticos difieren de los modelos de equilibrio termodinámico, ya que describen el proceso de reducción de carbonización utilizando expresiones de velocidad cinética obtenidas de los experimentos, en ciertos casos estos ya se encuentran tabulados, lo que permite una mejor simulación de los datos experimentales cuando el tiempo de residencia del gas y la biomasa es relativamente corto.

Los modelos cinéticos brindan información esencial sobre los mecanismos cinéticos para describir la conversión durante la gasificación de biomasa, lo cual es crucial para diseñar, evaluar y mejorar los gasificadores. Estos modelos cinéticos son precisos y detallados, pero también son computacionalmente intensivos. Además, los datos básicos del experimento son necesarios al construir y ejecutar los modelos. A veces, los modelos de equilibrio termodinámico se han combinado con modelos cinéticos. (Luque & Speight, 2015)

Modelo termodinámico

Un equilibrio termodinámico está definido en base a todos los modelos basados a los principios de la termodinámica, como la energía de Gibbs. El “modelo de equilibrio” se refiere a los modelos de equilibrio termodinámico, como los modelos de equilibrio de reacción química. La energía libre de Gibbs se minimiza cuando las especies de un sistema de reacción alcanzan el equilibrio y ya no experimentarán ningún cambio con el tiempo. (Luque & Speight, 2015)

Redox

El proceso de oxidación- reducción también llamada redox acrónimo de "reducción" y "oxidación". Originalmente, oxidación significaba una reacción química en la que el oxígeno se combina con otra sustancia, después de que Antoine Lavoisier, a finales del siglo XVIII, llamara óxido a un producto de la reacción. El término “reducción” se había utilizado mucho antes de la introducción del término “oxidación” en la fundición para producir hierro a partir de mineral y coque. (Nishinaga, 2015)

Según (Nishinaga, 2015), en la definición contemporánea recomendada por IUPAC, la oxidación es una reacción que debe satisfacer 3 tipos de criterios, el criterio 1 la eliminación neta completa de uno o más electrones de una entidad molecular, 2

un aumento en el número de oxidación de cualquier átomo dentro de cualquier sustrato y cumple en muchos casos el criterio 3 ganancia de oxígeno y/o pérdida de hidrógeno de un sustrato orgánico. Por el contrario, la reducción es el proceso inverso de la oxidación.

Capítulo III

Metodología

En el presente capítulo se describe la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto de Unidad de Integración Curricular. La investigación tuvo como objetivo el obtener un estudio técnico para aumentar la obtención de gas de síntesis a partir de biomasa y tereftalato de polietileno (PET), modificando sus propiedades como temperatura y presión. Para este estudio se utiliza un software de simulación de procesos químicos, donde se propone dos tipos de simulación; la primera considera una sola entrada de alimentación donde existe la mezcla de PET y Cascarilla de arroz y otra en donde existen dos tipos de entrada de alimentación es decir PET y Cascarilla de arroz por separado.

Para la elaboración de la modelación se ha utilizado la siguiente información.

Desarrollo del proceso

Materias Primas

En primer lugar, se analiza la alimentación del proceso para la simulación 1 y 2 considerado en ambos casos tanto la cantidad de tereftalato de polietileno y cascarilla de arroz sean iguales dando un flujo total de 2000 kg/h juntos, como se observa en la **Tabla 3**, las condiciones iniciales para el ingreso de las corrientes son normales es decir 25°C y 1 atm.

Tabla 3

Flujos máxicos de alimentación en las simulaciones.

Compuesto	Simulación	Flujo Máxico	Unidades
Tereftalato de polietileno	Simulación 2	1000	Kg/h
Biomasa (Cascarilla de arroz)	Simulación 2	1000	Kg/h

Compuesto	Simulación	Flujo Másico	Unidades
Biomasa (Cascarilla de arroz + tereftalato de polietileno)	Simulación 1	2000	Kg/h

Caracterización/ Propiedades físicas de las materias primas. En la **Tabla 4**, muestra las propiedades proxanal, ultanal y sulfanal de la corriente de alimentación de la simulación 1, en donde se encuentran la cascarilla de arroz junto con el tereftalato de polietileno, considerando que la relación entre los dos proporcionales 10:10 respectivamente, propiedades que son importantes para el ingreso de materiales no convencionales.

Tabla 4

Propiedades Físicas Materias Primas (Cascarilla de Arroz/PET).

Caracterización	Mezcla de (Cascarilla de arroz/ tereftalato de polietileno)
PROXANAL	
Humedad (wt%)	0%
Material volátil (wt%)	72,05%
Cenizas (wt%)	23,8%
Carbono Fijo (wt%)	14,5%
ULTANAL	
C	67,1%
H	0,9%
N	0,4%

Caracterización	Mezcla de (Cascarilla de arroz/ tereftalato de polietileno)
Cl	0%
S	0,2%
O	31,4%
SULFANAL	
Piritica	0%
Sulfatos	0%
Orgánicos	0%

Nota. Datos obtenidos de la investigación “Microwave co-pyrolysis of PET bottle waste and rice husk: effect of plastic waste loading on product formation”. Tomado de (Suriapparao et al., 2022)

En la siguiente **Tabla 5**, se considera las propiedades proxanal, ultanal y sulfanal de cada de una de las materias primas por separado, información necesaria para la realización de la simulación 2, donde existen dos entradas de alimentación con una relación másica proporcional.

Tabla 5

Propiedades Físicas Cascarilla de arroz y PET.

Caracterización	Biomasa Cascarilla de arroz	Tereftalato de polietileno (PET)
PROXANAL		
Humedad (wt%)	0%	0%
Materia volátil (wt%)	84,8%	70,5%
Cenizas (wt%)	0,7%	12,9%

Caracterización	Biomasa Cascarilla de arroz	Tereftalato de polietileno (PET)
Carbono Fijo (wt%)	14,5%	16,6%
ULTANAL		
C	66,4%	58,1%
H	0,2%	0,1%
N	0,4%	0,4%
Cl	0%	0
S	0,1%	0,2%
O	32,9%	41,2%
SULFANAL		
Piritica	0%	0%
Sulfatos	0%	0%
Orgánicos	0%	0%

Nota. Datos obtenidos de la investigación "Microwave co-pyrolysis of PET bottle waste and rice husk: effect of plastic waste loading on product formation". Tomado de (Suriapparao et al., 2022)

Diagrama de procesos

Para el desarrollo de un diagrama de proceso se usan cuadros que representan las operaciones unitarias. Estos cuadros se conectan luego por líneas con flechas que indican el flujo o la dirección a la que se debe proceder para conocer el siguiente paso. (Jyoti et al., 2020)

Diagrama de Flujo (BFD)

A continuación, se puede observar una forma simplificada el proceso de la obtención de gas de síntesis, a base de una mezcla de biomasa "Cascarilla de arroz" y

tereftalato de polietileno para la configuración 1, como se observa en la **Figura 8**, mientras que para la configuración 2 y 3, con dos corrientes de alimentación se encuentra en la **Figura 9**. El diagrama de flujo de bloques (BFD) tiene como finalidad mostrar de una manera simplificada una estructura básica de los procesos que realizan a nivel industrial.

Figura 8

Diagrama de flujo de bloques del proceso de obtención (BFD) configuración 1.

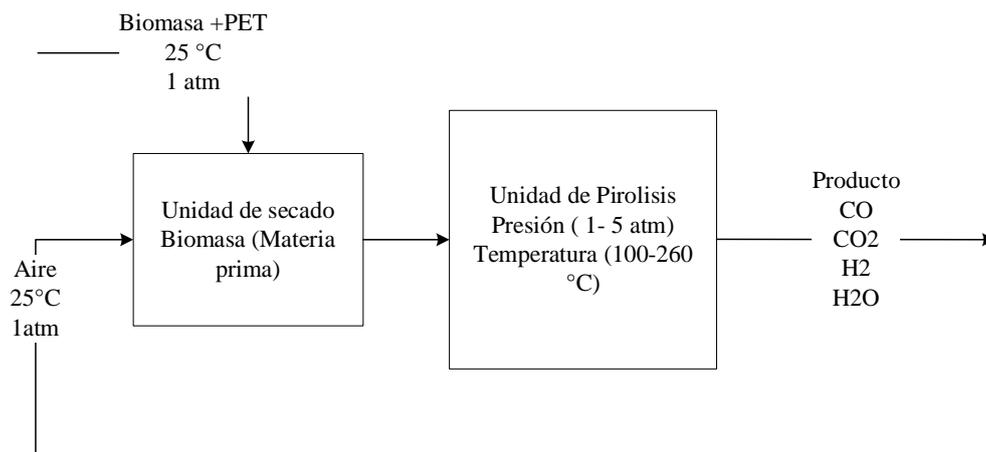


Figura 9

Diagrama de flujo de bloques del proceso de obtención (BFD) configuraciones 2 y 3.

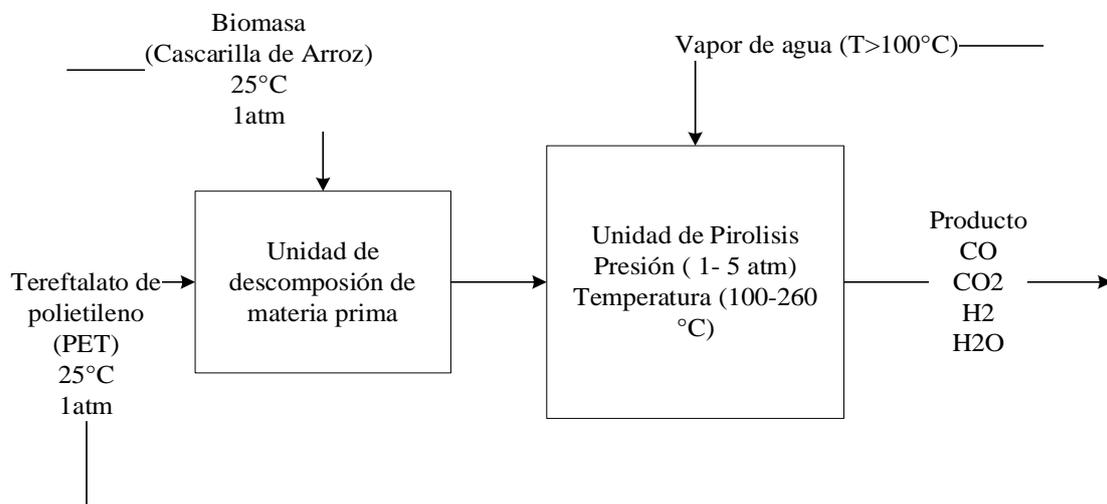


Diagrama de Flujo de procesos (PFD)

El diagrama de flujo de bloques (BFD) es utilizado como un punto de partida para la realización del diagrama de flujo de procesos (PFD) completo para las dos simulaciones, en esta se puede detallar los flujos en general de un sistema y los equipos utilizados para su realización. La **Figura 10** muestra en detalle un diagrama de flujo del proceso para la configuración 1, y la **Figura 11** *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.* para la configuración 2 y 3, para la obtención del gas de síntesis.

Figura 10

Diagrama de flujos del proceso para la obtención del gas de síntesis configuración 1

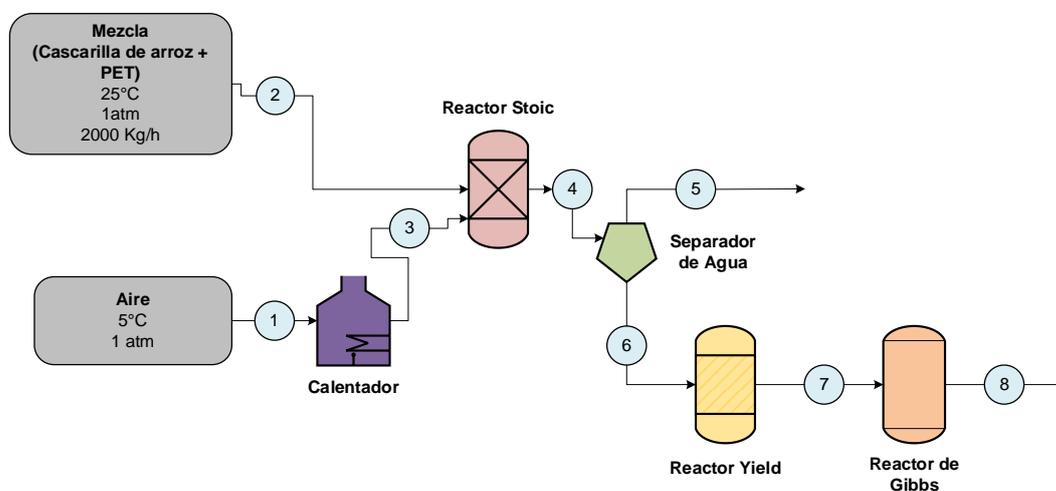
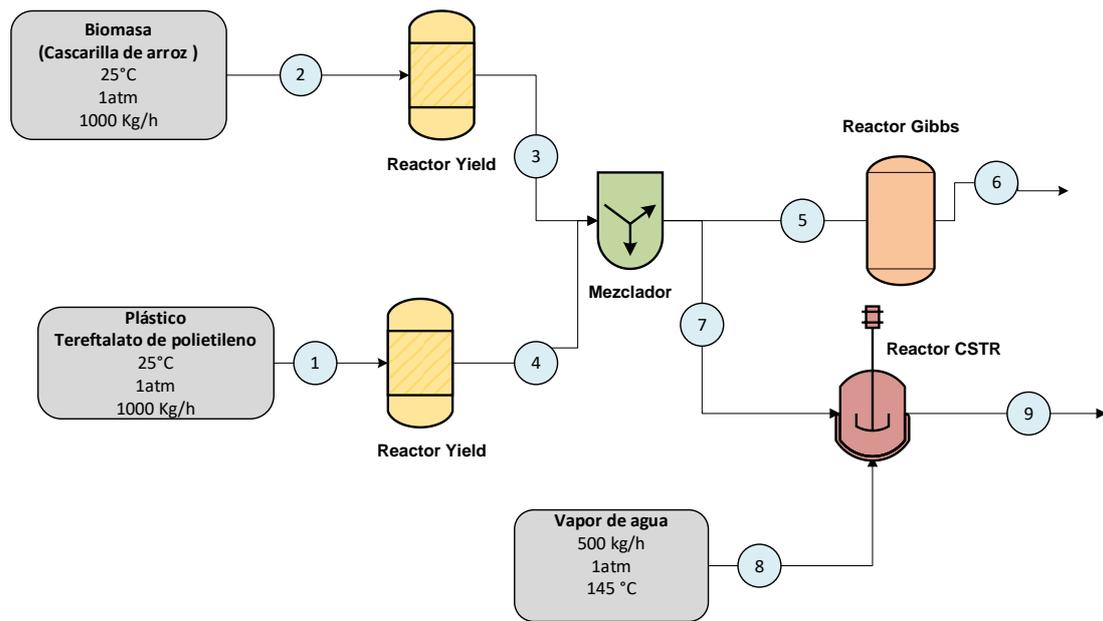


Figura 11

Diagrama de flujos del proceso para la obtención del gas de síntesis configuración 2 y



Metodología experimental

La metodología experimental del presente trabajo se basa en un modelo termodinámico y un modelo cinético, en donde se pueda observar la influencia a la hora de obtener gas de síntesis.

Componentes presentes en la simulación

- Agua (H_2O)
- Nitrógeno (N_2)
- Oxígeno (O_2)
- Biomasa
- PET
- Dióxido de carbono (CO_2)
- Monóxido de carbono (CO)
- Metano (CH_4)
- Carbono sólido (C)
- Azufre sólido (S)

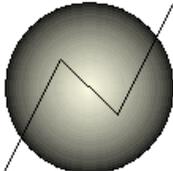
- Dióxido de azufre (SO_2)
- Trióxido de azufre (SO_3)
- ASH
- Ácido sulfhídrico (H_2S)
- Hidrógeno (H_2)
- Óxido nítrico (NO)
- Dióxido de nitrógeno (NO_2)
- Amoníaco (NH_3)

Equipos para utilizar en la simulación

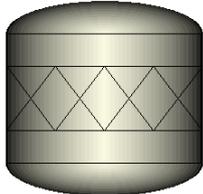
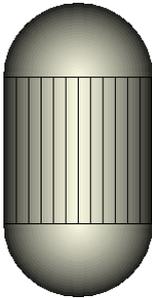
De acuerdo a la información otorgada por (Becker et al., 2015), se puede especificar los equipos usados para el desarrollo de la simulación con su respectiva ilustración y utilidad como se observa en la **Tabla 6**.

Tabla 6

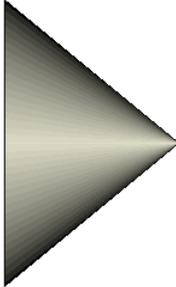
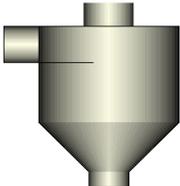
Descripción de equipos usado en el software de simulación.

Operaciones unitarias software de simulación de procesos químicos		
Equipo	Utilidad	Ilustración
Heater /Cooler	Es considerado como un intercambiador de calor básico. El cual efectúa cálculos simples de balance de energía.	

Operaciones unitarias software de simulación de procesos químicos

Equipo	Utilidad	Ilustración
Reactores		
RStoic	<p>Tiene como objetivo modelar aquellos reactores estequiométricos con conversiones específicos, no necesita de la cinética química de la reacción.</p>	
RYield	<p>Procesos donde la cinética química y la estequiometría son desconocidas o consideradas poco importantes, sin embargo, el rendimiento es conocido.</p>	
RGibbs	<p>Calcula los equilibrios de fase tanto para disoluciones de sólidos como para sistemas en estado vapor-líquido-sólido.</p>	

Operaciones unitarias software de simulación de procesos químicos

Equipo	Utilidad	Ilustración
Mezclador	Esta operación permite la combinación de dos o más corrientes para atender una sola corriente.	
Separadores		
Destilación Flash	Permite la separación de dos fases en equilibrio con una o varias corrientes de alimentación, bajo condiciones de presión y temperatura. La corriente inferior la parte líquida y/o sólida y la corriente superior vapor.	
Separador	En estas unidades de operaciones se pueden separar los compuestos de varias entradas en varias salidas.	
Ciclones e hidrociclón	Operación unitaria que permite la separación de sólidos.	

Nota. Información obtenida de “Tutorial de ASPEN PLUS Introducción y modelos simples de operaciones unitarias”. Tomado de (Becker et al., 2015)

Simulación

Selección de los componentes

Para la presente simulación tenemos que ingresar en primer lugar los componentes que se encuentran involucrados en el proceso como se observa en la **Figura 12**, para ello es importante saber qué tipo de componente es cada uno, ya que el programa los clasifica como: componentes puros, pseudocomponentes, componentes no convencionales, sólidos y sales. (Becker et al., 2015)

Figura 12

Selección de componentes.

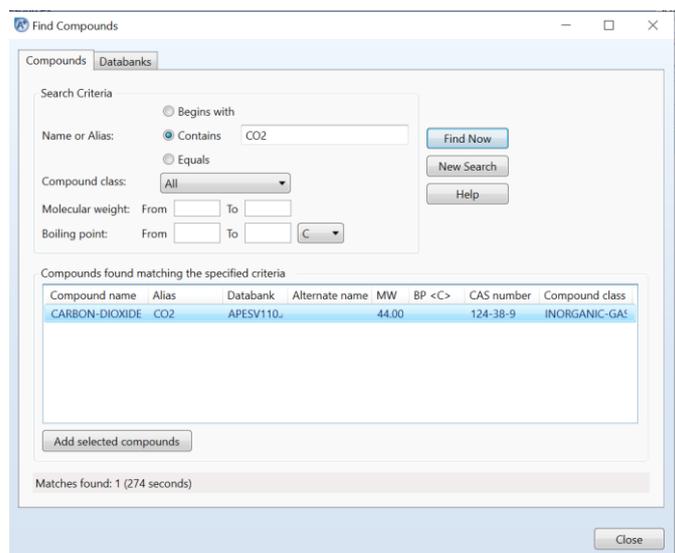


Figura 13

Componentes sólidos no convencionales.

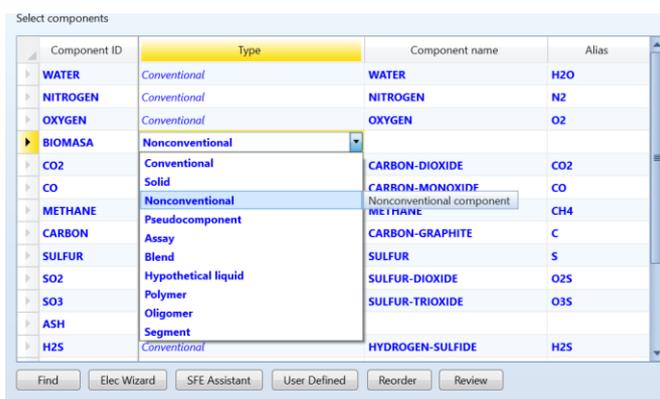


Figura 14*Componentes sólidos.*

Select components

Component ID	Type	Component name	Alias
WATER	Conventional	WATER	H2O
NITROGEN	Conventional	NITROGEN	N2
OXYGEN	Conventional	OXYGEN	O2
BIOMASA	Nonconventional		
CO2	Conventional	CARBON-DIOXIDE	CO2
CO	Conventional	CARBON-MONOXIDE	CO
METHANE	Conventional	METHANE	CH4
CARBON	Solid	CARBON-GRAPHITE	C
SULFUR	Conventional	SULFUR	S
SO2	Solid	Conventional solid component	O2S
SO3	Nonconventional	SULFUR-TRIOXIDE	O3S
ASH	Pseudocomponent		
H2S	Assay	HYDROGEN-SULFIDE	H2S

Find Elec Wiz Reorder Review

Selección de paquete termodinámico

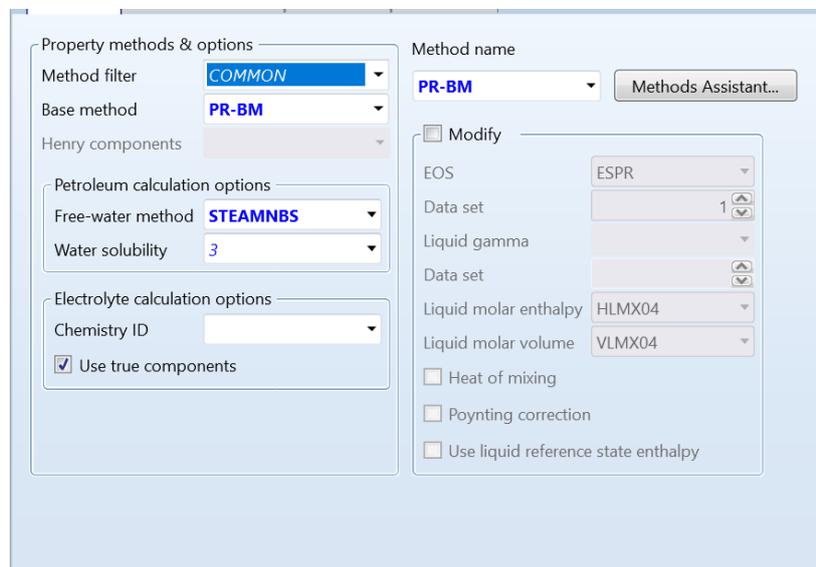
El paquete o modelo termodinámico elegido para el proceso de obtención de gas de síntesis a partir de biomasa “cascarilla de arroz” y tereftalato de polietileno es “Peng & Robinson con Boston-Mathias”, como se puede observar en la **Figura 15**. Este paquete es usado para la estimación de las propiedades físicas de los componentes no convencionales en la simulación. Alpha es un parámetro dependiente de la temperatura que mejora la correlación de la presión de vapor del componente puro a temperaturas muy altas. Por esta razón, PR-BM era adecuado para el proceso de pirólisis, ya que se trata de temperaturas relativamente altas además es utilizado ampliamente para la separación de hidrocarburos, goza una amplia aceptación en aplicaciones de la industria de gas, petróleo y petroquímica, otro paquete termodinámico también útil es el SRK. (Adeniyi et al., 2018)

Se descarta el modelo Ideal y RK; puesto que a presiones bajas o moderadas pueden usarse los un modelo termodinámico ideal ya que también existe poca

interacción molecular entre los componentes. El RK son usados en sistemas que involucran gases, pero no es recomendable su aplicación.

Figura 15

Selección del paquete termodinámico.



Desarrollo de la simulación: Modelo termodinámico

Las simulaciones para usando modelos termodinámicos, se encuentra subdividas en dos unidades cada uno con un objetivo específico, estas unidades son:

- Unidad de secado y/o Descomposición
- Unidad de Pirólisis

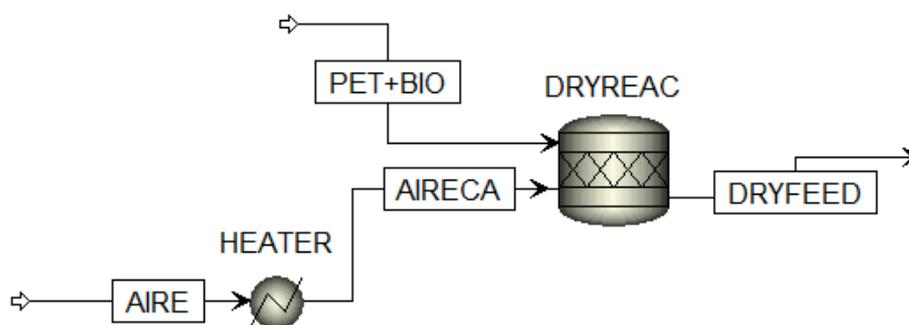
Unidad de secado simulación 1. La biomasa se puede procesar en diferentes biocombustibles mediante varias técnicas, incluida la digestión anaeróbica, la fermentación de carbohidratos. Antes de realizar la simulación es importante que la biomasa se encuentre seca ya que la aplicación del secado de biomasa puede reducir significativamente los gastos relacionados con el manejo y el procedimiento de conversión, lo que puede ayudar a mejorar la economía de la conversión de la

biomasa. Además, el secado de biomasa es una etapa importante para maximizar la eficiencia de la combustión directa y la gasificación. (EL-Mesery & El-khawaga, 2022)

La unidad de secado como se muestra en la **Figura 16** consta de un heater, de un reactor estequiométrico (RStoic) y un separador flash. El heater se encarga de calentar el aire que ingresa a condiciones normales es decir 25°C y 1 atm, a una temperatura de 100°C generando vapor de agua, secando la mezcla ingresada.

Figura 16

Unidad de secado.



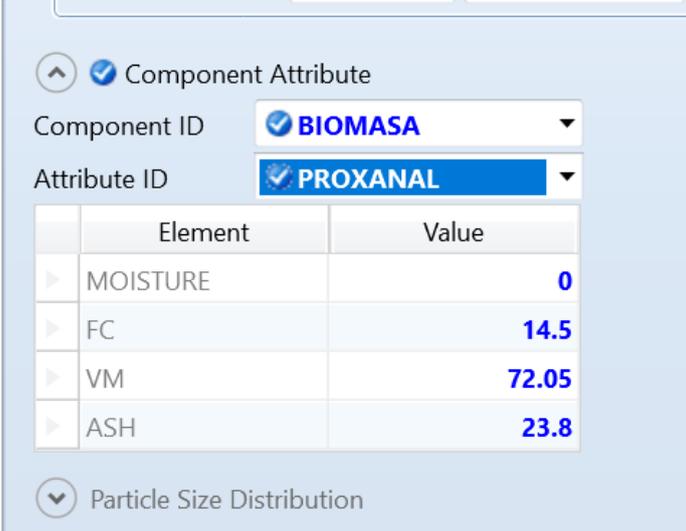
El Rstoic también conocido como reactor estequiométrico, ya que con este reactor se puede conocer la estequiometría de la reacción, pero la información de la cinética química no es importante. En este ingresa la mezcla “cascarilla de arroz + PET” con el aire caliente, haciendo que este se caliente. La mezcla seca obtenida del calentador “Dryreac”, es orientada a una unidad de separador flash, donde la corriente superior se obtiene el vapor de agua, mientras que en la corriente inferior se encuentra la mezcla seca.

Para la corriente de alimentación se debe especificar las características/ propiedades que la mezcla “cascarilla de arroz + PET” que se presenta en la

alimentación como se observan en las **Figura 17**, **Figura 18** y **Figura 19**; propiedades como sulfanal, proxanal y ultanal que se encuentran establecidas en la **Tabla 4**.

Figura 17

Ingreso de Propiedades Proxanal de Biomasa de alimentación.



Component Attribute

Component ID: BIOMASA

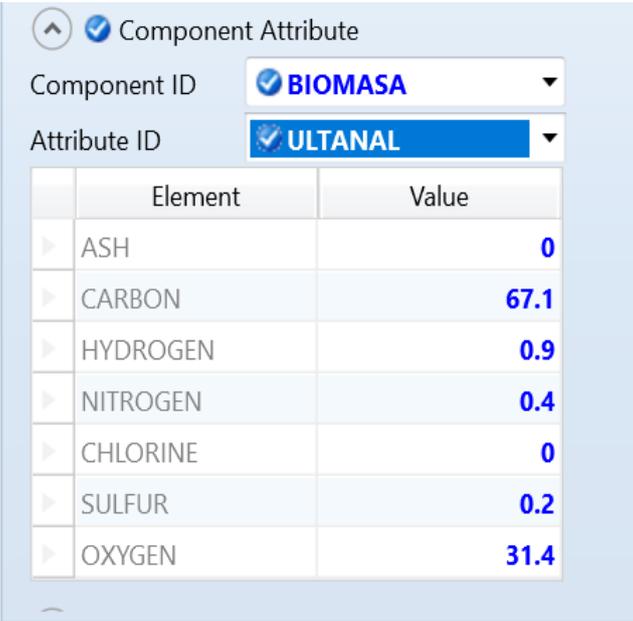
Attribute ID: PROXANAL

	Element	Value
▶	MOISTURE	0
▶	FC	14.5
▶	VM	72.05
▶	ASH	23.8

Particle Size Distribution

Figura 18

Ingreso de Propiedades Ultanal de Biomasa de alimentación.



Component Attribute

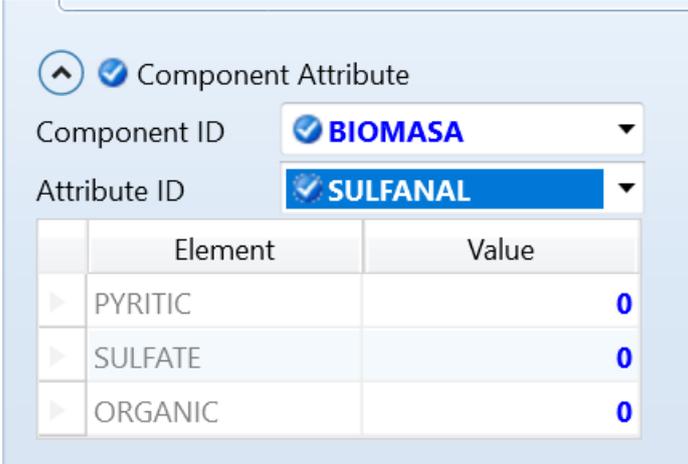
Component ID: BIOMASA

Attribute ID: ULTANAL

	Element	Value
▶	ASH	0
▶	CARBON	67.1
▶	HYDROGEN	0.9
▶	NITROGEN	0.4
▶	CHLORINE	0
▶	SULFUR	0.2
▶	OXYGEN	31.4

Figura 19

Ingreso de Propiedades Sulfanal de Biomasa de alimentación.



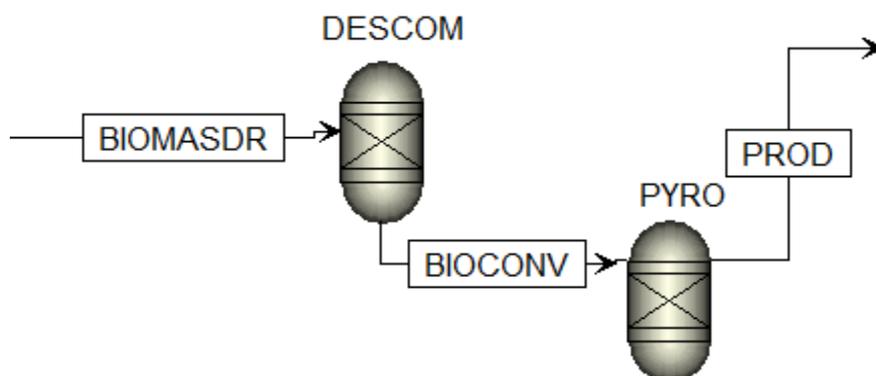
	Element	Value
▶	PYRITIC	0
▶	SULFATE	0
▶	ORGANIC	0

Unidad de pirólisis simulación 1. Una vez realizado el proceso de secado de la biomasa, la corriente que contiene la mezcla seca, es una corriente de componentes no convencionales, es decir componente que mientras no se transforme a convencionales, no se encontraran involucrados en un equilibrio de fase o equilibrio de reacción, ya que este componente solo se caracteriza por sus atributos, que por sus propiedades moleculares.

La unidad consta de dos reactores RYield y RGibbs, como se puede observar en la **Figura 20**.

Figura 20

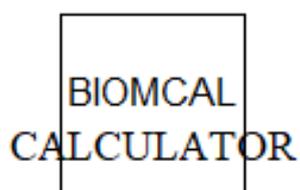
Unidad de Pirólisis.



Según (Ojeda Paredes, 2018), el reactor RYield nombrado “Descom”, corresponde a un reactor de rendimiento, en el cual, con ayuda de subrutinas en el bloque de cálculo como se muestra en la **Figura 21** con un lenguaje en FORTRAN, se estimó la composición de la biomasa, que permitirán posteriormente simular las reacciones para el modelo termodinámico o cinético.

Figura 21

Block Calculator.



Los valores de rendimiento para los elementos de nitrógeno, oxígeno, carbono, azufre, cantidad de ceniza e hidrógeno, son obtenidos gracias al lenguaje FORTRAN se encuentra a continuación:

Ecuación 1

Lenguaje FORTRAN.

Factor (FACT), para convertir el análisis elementad en su base húmeda

$$FACT = \frac{(100 - WATER)}{100}$$

Ecuación 2

Lenguaje Fortran (Agua)

$$H_2O = \frac{Water}{100}$$

Ecuación 3

Lenguaje Fortran (ASH).

$$ASH = \frac{ULT(1)}{100} * FACT$$

Ecuación 4

Lenguaje Fortran (C).

$$CARB = \frac{ULT(2)}{100} * FACT$$

Ecuación 5

Lenguaje Fortran (Hidrógeno).

$$H_2 = \frac{ULT(3)}{100} * FACT$$

Ecuación 6

Lenguaje Fortran (Nitrógeno).

$$N_2 = \frac{ULT(4)}{100} * FACT$$

Ecuación 7

Lenguaje Fortran (Cloro).

$$Cl_2 = \frac{ULT(5)}{100} * FACT$$

Ecuación 8

Lenguaje Fortran (Azufre).

$$SULF = \frac{ULT(6)}{100} * FACT$$

Ecuación 9

Lenguaje Fortran (Oxígeno).

$$O_2 = \frac{ULT(7)}{100} * FACT$$

El reactor "Pyro" es una unidad de RGibbs el cuarto bloque de reactores pertenecientes al software de simulación de proceso químicos, este no necesita información detallada de la estequiometría ni tampoco del rendimiento de la reacción, los cálculos que realiza son en base a la minimización de la energía de Gibbs. El

reactor de Gibbs permite la entrada de dos o más corrientes, así como de salida. Se usa para calcular el equilibrio de fase y/o químico.

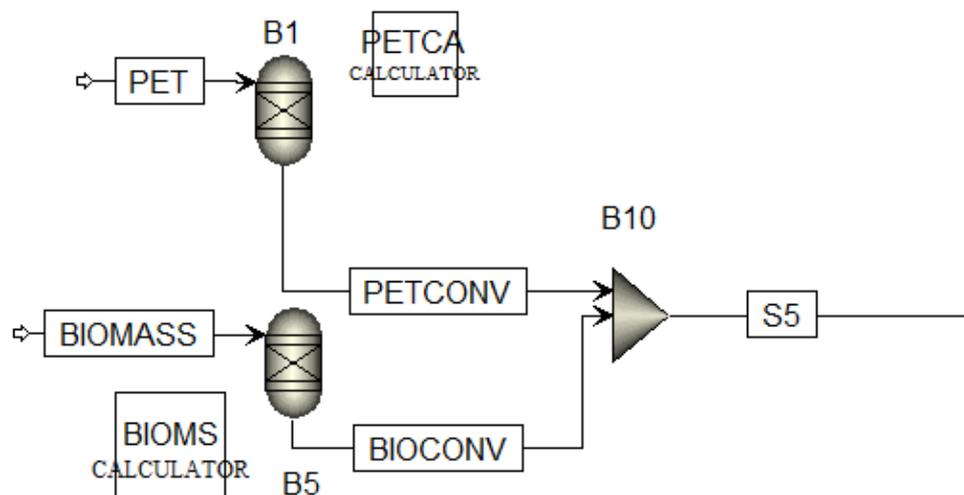
Los productos obtenidos del reactor de Gibbs, que se encuentran en la corriente "PROD" son llevados posteriormente a un separador flash, donde se obtiene dos tipos de corrientes: compuestos volátiles (vapor de agua, nitrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano, entre otros) y los no volátiles (cantidad de ceniza y carbono sólido).

Unidad de descomposición materias primas PET/Biomasa simulación 2.

Como se puede observar en la **Figura 22**, en esta simulación las materias primas ingresan en corrientes separadas en donde se usan sus respectivas propiedades: ultanal, sulfanal y proxanal; propiedades que se encuentran especificadas en la **Tabla 5**, cabe señalar que dichas propiedades tienen una relación másica de PET/cascarilla de arroz iguales, estas corrientes de alimentación son llevadas a reactores RYield para su respectiva descomposición, mediante el mismo lenguaje FORTRAN que se encuentra en la **Ecuación 1**,

Figura 22

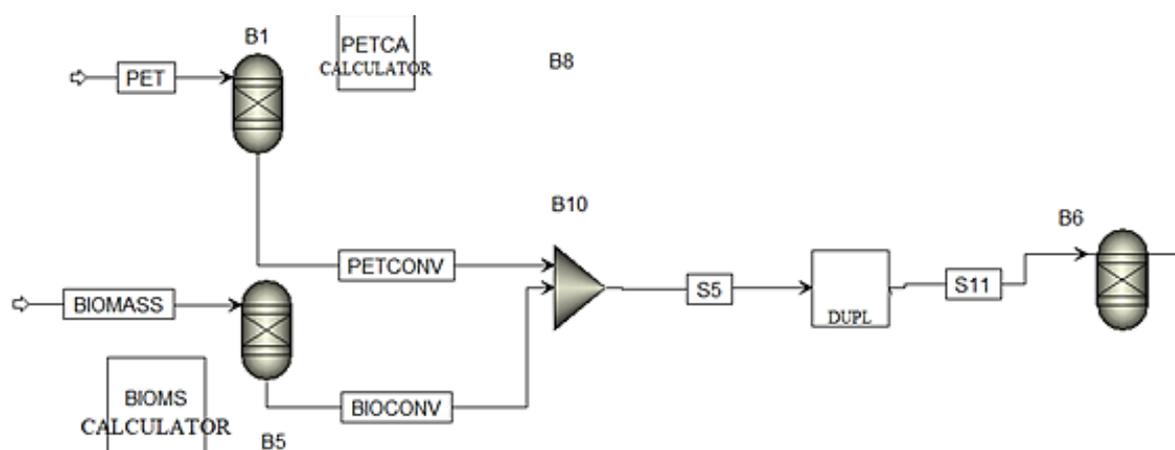
Mezcla de Corrientes Materia Prima.



Unidad de pirólisis simulación 2. Una vez realizado la descomposición de cada uno de sus atributos es decir contenido de: carbono, cantidad de cenizas, hidrógeno, nitrógeno cloro, azufre y oxígeno, ingresan a la unidad de pirólisis; como se muestra la **Figura 23**. Para el modelo termodinámico se usa solamente un R-Gibbs, puesto que no necesita ningún dato de velocidad de reacción, entre otros. Las temperaturas de para la pirólisis oscilan entre 400-500 °C según el plástico.

Figura 23

Proceso de Pirólisis.



Diseño de simulación: modelo cinético simulación 2

Los modelos cinéticos difieren de los modelos de equilibrio termodinámico, ya que describen el proceso de reducción de carbonización utilizando expresiones de velocidad cinética (Luque & Speight, 2015). El modelado cinético requiere expresiones matemáticas como son: la energía de activación (E), así como el factor pre-exponencial (A), para las reacciones que se encuentran reaccionando en el reactor CSTR.

Las reacciones usadas para el reactor CSTR como se observa en la siguiente **Tabla 7** con su respectiva velocidad de reacción.

Tabla 7

Cinética de reacción para las tasas de conversión en un reactor gasificador.

Reacciones	Velocidad de reacción
$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	$r = 1,272 * m_S * T * \exp\left(\frac{-22645}{T}\right) [H_2O]$
$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	$r = 7,68 * 10^{10} * T * \exp\left(\frac{-36640}{T}\right) [CO]^{0,5} [H_2O]$
$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	$r = 1,272 * m_S * T * \exp\left(\frac{-22645}{T}\right) [CO_2]$
$0,5C + H_2 \rightarrow 0,5 CH_4$	$r = 1,368 * 10^{-3} * m_S * T$ $* \exp\left(\frac{-8078}{T} - 7,087\right) [H_2]$

Nota. "Aspen Plus Simulation of Biomass Gasification with known Reaction Kinetic ".

Tomado de (Eikeland et al., 2015)

Caracterización química del gas

La caracterización del contenido de un gas de síntesis que es obtenido básicamente de los residuos plásticos se encuentra especificado en la siguiente **Tabla 8**, el cual sirve como base de análisis para los resultados obtenido y así saber identificar que configuración es más óptima.

Tabla 8

Contenidos del gas de Síntesis.

Componente	% Peso Molar (g/mol)
CO	28,01
CO2	44,01
H2	2,016
CH4	16,04

Componente	% Peso Molar (g/mol)
C2H4	28,01
C2H6	30,048
N2	28,01
H2O	18,016
H2S	34,08

Nota. Tabla obtenida del estudio "System analysis for synthesis gas (syngas) production in Pakistan from municipal solid waste gasification using a circulating fluidized bed gasifier". Tomado de (Shehzad et al., 2016).

Capítulo IV

Resultados y discusiones

En este capítulo se da conocer los resultados obtenidos del desarrollo de un proceso de pirólisis para la obtención del gas de síntesis a partir de biomasa y el tereftalato de polietileno (PET), mediante el uso de un software de simulación de procesos químicos.

Productos obtenidos de cada simulación

Configuración 1 (modelo termodinámico)

Los productos obtenidos en la configuración según su composición másica en unidades de kg/h se puede observar en la siguiente **Tabla 9**.

Tabla 9

Composición másicas de los productos obtenidos en la configuración 1.

Compuestos	Unidades	Corrientes		
		PET+BIO	PROD	H₂O
<i>Mass Flows</i>	<i>kg/hr</i>	<i>2000</i>	<i>1600</i>	<i>400</i>
<i>WATER</i>	<i>kg/hr</i>	<i>0</i>	<i>172,431</i>	<i>400</i>
<i>NITROGEN</i>	<i>kg/hr</i>	<i>0</i>	<i>15,091</i>	<i>0,008</i>
<i>OXYGEN</i>	<i>kg/hr</i>	<i>0</i>	<i>1,71E-18</i>	<i>0,003</i>
<i>BIOMASA</i>	<i>kg/hr</i>	<i>2000</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>CO₂</i>	<i>kg/hr</i>	<i>0</i>	<i>319,743</i>	<i>0</i>
<i>CO</i>	<i>kg/hr</i>	<i>0</i>	<i>443,690</i>	<i>0</i>
<i>METHANE</i>	<i>kg/hr</i>	<i>0</i>	<i>63,198</i>	<i>0</i>
<i>CARBON</i>	<i>kg/hr</i>	<i>0</i>	<i>508,296</i>	<i>0</i>
<i>SULFUR</i>	<i>kg/hr</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>SO₂</i>	<i>kg/hr</i>	<i>0</i>	<i>9,64E-09</i>	<i>0</i>
<i>SO₃</i>	<i>kg/hr</i>	<i>0</i>	<i>1,03E-18</i>	<i>0</i>

Corrientes				
Compuestos	Unidades	PET+ BIO	PROD	H₂O
ASH	kg/hr	0	22,083	0
H ₂ S	kg/hr	0	0,688	0
HYDROGEN	kg/hr	0	54,710	0
NO	kg/hr	0	5,77E-13	0
NO ₂	kg/hr	0	5,52E-24	0
H ₃ N	kg/hr	0	0,070	0

La tabla anterior da a conocer como la corriente de alimentación de la mezcla “Pet + Bio” tiene su flujo másico total de 2000 Kg/h siendo este un compuesto no convencional; no obstante, mediante el proceso de pirólisis y gasificación se puede descomponer en productos siendo C , CO , CO_2 , H_2O , CH_4 y H_2 , los productos con mayor cantidad de flujos másicos a diferencia de los demás. Para ello las condiciones del separador de vapor de agua es de 800°C y 0,5 bar.

Configuración 2 (modelo termodinámico)

La simulación dos con corrientes de alimentación separadas, permitió la obtención de los siguientes productos, los cuales se encuentran tabulados en la siguiente **Tabla 10**.

Tabla 10

Composiciones másicas obtenidas configuración 2.

Corrientes				
Compuesto	unidades	PET	BIOMASA	PRODUGIB
Mass Flows	kg/hr	1000	1000	2000
H ₂ O	kg/hr	0	0	0
N ₂	kg/hr	0	0	8

Corrientes				
Compuesto	unidades	PET	BIOMASA	PRODUGIB
H ₂	kg/hr	0	0	1,2436E-05
CO ₂	kg/hr	0	0	2,70821E-14
CO	kg/hr	0	0	1297,28
CH ₄	kg/hr	0	0	11,935
C	kg/hr	0	0	679,784
S	kg/hr	0	0	2,99102
O ₂ S	kg/hr	0	0	0
O ₃ S	kg/hr	0	0	0
H ₃ N	kg/hr	0	0	1,23635E-12
NO	kg/hr	0	0	2,2923E-22
NO ₂	kg/hr	0	0	0
O ₂	kg/hr	0	0	0
PET	kg/hr	1000	0	0
BIOMASA	kg/hr	0	1000	0
ASH	kg/hr	0	0	0
H ₂ S	kg/hr	0	0	0,009539

Con la simulación 2 se puede observar que el contenido del agua es nula esto se debe a que las materias primas presentan un contenido de humedad de 0 como menciona (Suriapparao et al., 2022), mientras que el contenido de los compuestos CO y Carbono son los productos con mayor cantidad es decir 1297,28 y 679,78 kg/h respectivamente; sin embargo componentes como CH₄ y N₂ aunque en menor cantidad pero se encuentran presentes, el H₂ como se observa tiene una cantidad muy pequeña y es necesario mejorar este rendimiento en base a un diseño de

especificaciones o implementación de un diseño de procesos con más unidades de operación.

Configuración 3 (modelo cinético)

En base la simulación de un reactor CSTR, las corrientes ya descompuestas no presentan H_2O , debido a que ninguna de estas tiene contenido de humedad, lo que dificulta la reacción es por lo que al ingresar una corriente de agua esta puede lograr obtener los productos deseados en base a su cinética de reacción. Los resultados de los productos obtenidos a base el uso de un CSTR a temperatura de $500^{\circ}C$ y una presión de 1 bar, se encuentra ya tabulados en la siguiente **Tabla 11**, se considera un flujo másico de agua de 500 Kg/h.

Tabla 11

Composiciones másicas obtenidas de la configuración 3.

Compuestos	Unidades	Producto
<i>Mass Flows</i>	<i>kg/hr</i>	<i>2.500</i>
H_2O	<i>kg/hr</i>	<i>2</i>
N_2	<i>kg/hr</i>	<i>8</i>
H_2	<i>kg/hr</i>	<i>59</i>
CO_2	<i>kg/hr</i>	<i>66</i>
CO	<i>kg/hr</i>	<i>691</i>
CH_4	<i>kg/hr</i>	<i>0</i>
C	<i>kg/hr</i>	<i>931</i>
S	<i>kg/hr</i>	<i>3</i>
O_2S	<i>kg/hr</i>	<i>0</i>
O_3S	<i>kg/hr</i>	<i>0</i>
H_3N	<i>kg/hr</i>	<i>0</i>
NO	<i>kg/hr</i>	<i>0</i>

Compuestos	Unidades	Producto
NO_2	kg/hr	0
O_2	kg/hr	741
PET	kg/hr	0
BIOMASA	kg/hr	0
ASH	kg/hr	0
H_2S	kg/hr	0

Posteriormente se realiza un análisis de sensibilidad para conocer a que temperatura y presión el reactor CSTR debería tener, para obtener mayores rendimientos en los productos deseados con la misma alimentación, y así optimizar el proceso del modelo cinético.

Puntos óptimos de trabajos para mayor obtención de gas de síntesis

Análisis de sensibilidad para encontrar las condiciones óptimas para la configuración 1.

Se realiza un análisis de sensibilidad en dos equipos: en el reactor Gibbs y en el separador de agua, para determinar la temperatura como se muestra en la **Figura 24** y presión **Figura 25** óptima para la obtención de productos que conforman el gas de síntesis.

Configuración 1 separador de H₂O

Figura 24

Análisis de sensibilidad para el Separador de H₂O con respecto a la temperatura.

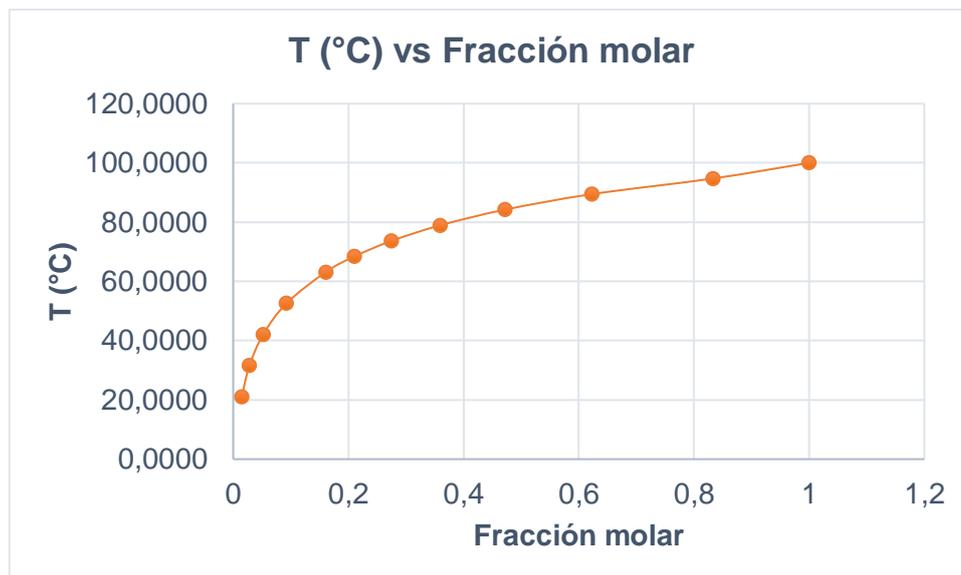
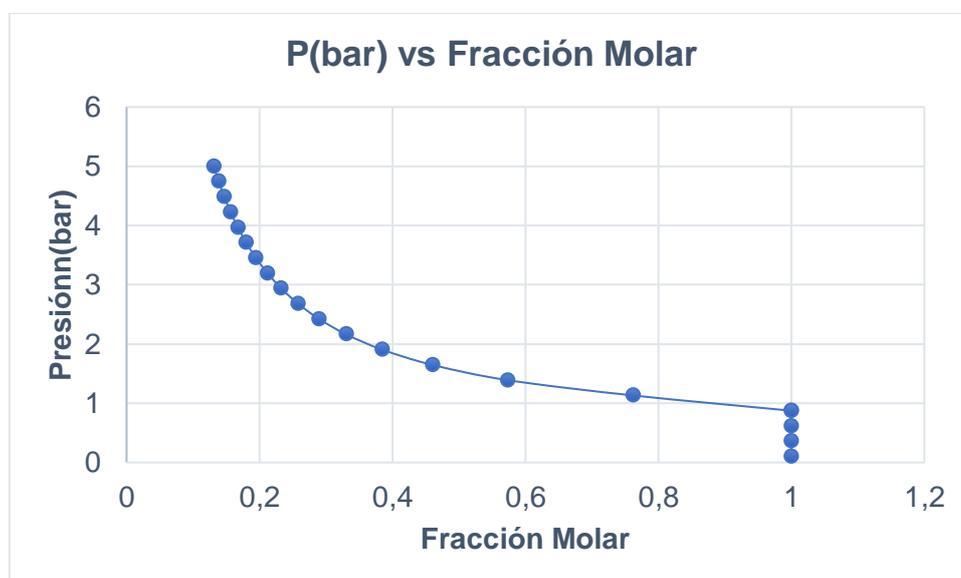


Figura 25

Análisis de sensibilidad para el separador de H_2O con respecto a la presión.

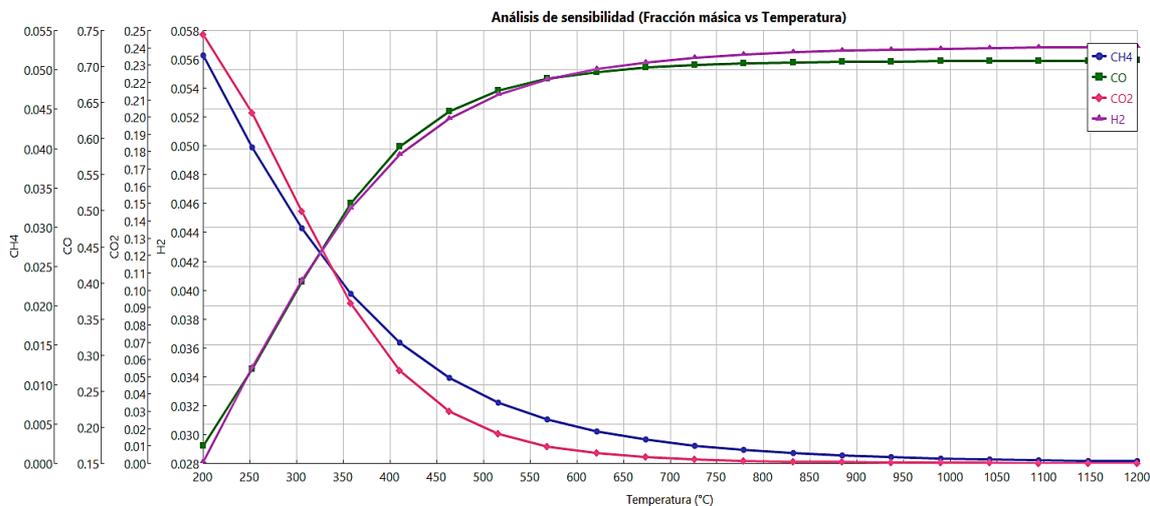


De acuerdo con la curva obtenida del análisis de sensibilidad con respecto a la temperatura y presión en el equipo de separación del agua, se puede observar que el punto óptimo para lograr una separación completa del H_2O es a 100°C y una presión de 0,87 bar.

Configuración 1 Reactor Gibbs

Figura 26

Análisis de sensibilidad al equipo PYRGIBBS.



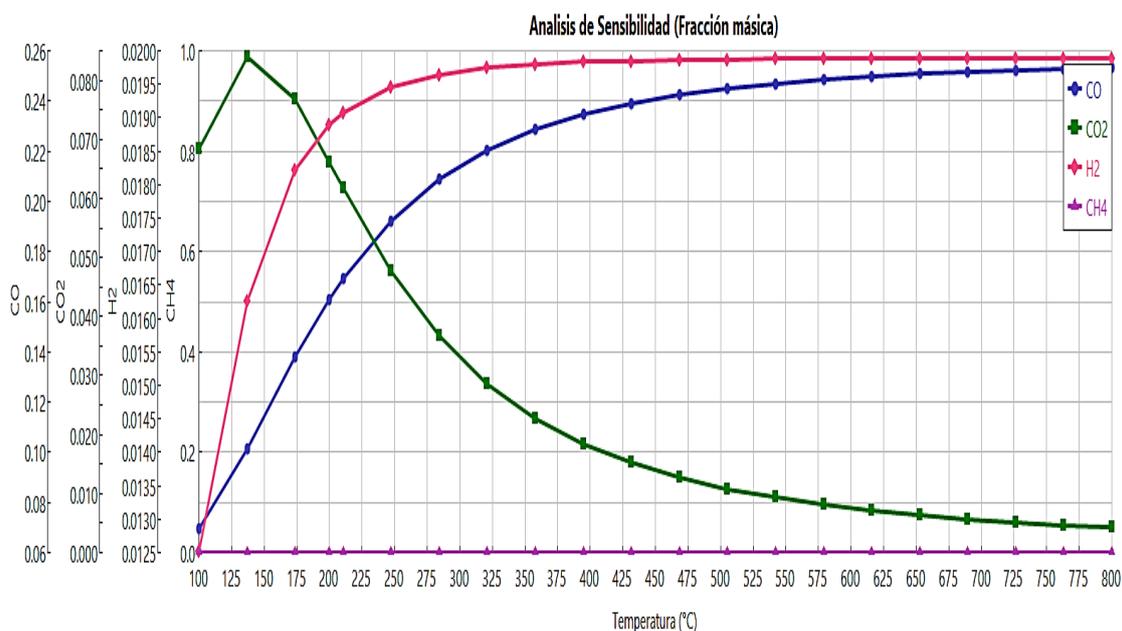
En el presente análisis de sensibilidad de la **Figura 26**, se observa que el rango de temperatura del reactor Gibbs, para obtener la mayor cantidad de productos, principalmente CO y H_2 es de entre (830 – 1050 °C), sin embargo, si se desea un gas de síntesis con los siguientes productos CO_2 , H_2 , CO y CH_4 se debe trabajar con un rango de temperatura (300 – 400 °C).

Análisis de sensibilidad para encontrar las condiciones óptimas para la configuración 3

Configuración 3 Reactor CSTR (T). Se realizó un análisis de sensibilidad para el modelo cinético en el reactor CSTR, para conocer la temperatura y presión óptima que permita obtener la mayor cantidad de fracciones másicas de gas de síntesis.

Figura 27

Análisis de Sensibilidad para el Equipo.

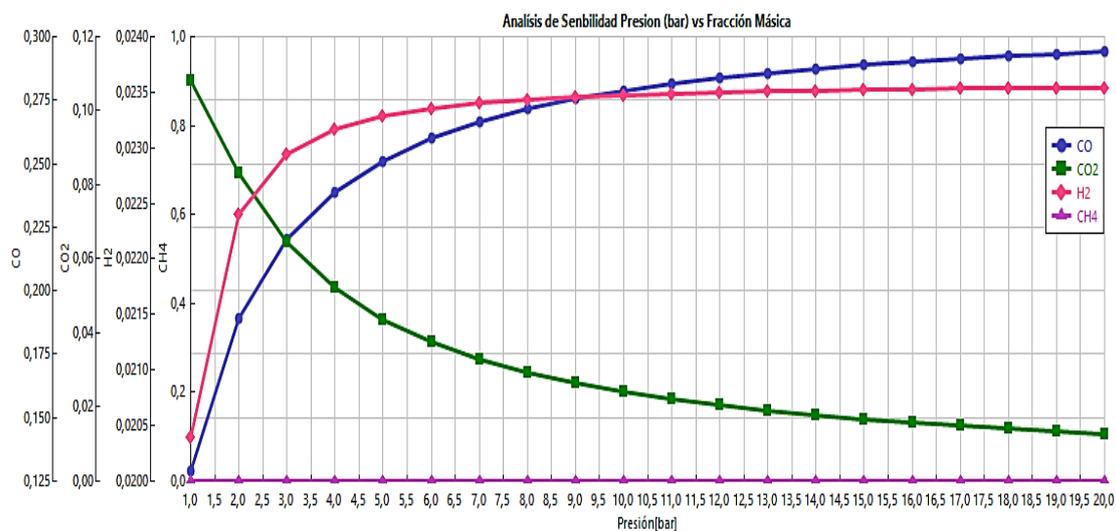


En el presente análisis de sensibilidad de la **Figura 27**, se observa que el rango de temperatura del reactor CSTR, para obtener la mayor cantidad de productos, principalmente CO y H_2 con 0,24; 0,020 respectivamente, es de entre (425 – 800 °C), sin embargo, si se desea un gas de síntesis con los siguientes productos CO_2 , H_2 y CO se debe trabajar con un rango de temperatura (175 – 300 °C), de la misma manera se observa que el CH_4 a pesar de que la temperatura aumente la fracción másica de este es nula.

Configuración 3 reactor CSTR (P). La **Figura 28**, muestra la fracción másica de productos, en función de la presión. Esto nos indica que la presión mínima para obtener un gas de síntesis rico en (CO , H_2 , CO_2 , CH_4) debe ser de 9 bar.

Figura 28

Análisis de sensibilidad de la presión en el Reactor CSTR.



Una vez se realizó el análisis de sensibilidad en el reactor CSTR para la presión y temperatura se procedió a seleccionar las condiciones que permitan obtener un gas de síntesis con un porcentaje alto en hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano. Las condiciones utilizadas en el reactor CSTR fueron para la presión 5 bar y 300 °C.

Productos obtenidos de cada simulación con puntos óptimos

Configuración 1 (modelo termodinámico)

Para la simulación uno la composición másica en Kg/h de cada componente, productos de la reacción de pirólisis y gasificación se encuentran tabulados en la

Tabla 12.

Tabla 12

Composiciones másicas obtenidas configuración 1.

Compuesto	Unidades	Corrientes		
		PET+ BIO	PROD	H ₂ O
Mass Flows	kg/hr	2000	1920	80,0109

Corrientes				
Compuesto	Unidades	PET+ BIO	PROD	H₂O
WATER	kg/hr	0	206,8149	79,9999
NITROGEN	kg/hr	0	18,1093	0,0084
OXYGEN	kg/hr	0	2,05E-18	0,0026
BIOMASA	kg/hr	2000	0	0
CO ₂	kg/hr	0	383,5760	0
CO	kg/hr	0	532,7338	0
METHANE	kg/hr	0	75,9649	0
CARBON	kg/hr	0	609,7602	0
SULFUR	kg/hr	0	0	0
SO ₂	kg/hr	0	1,16E-08	0
SO ₃	kg/hr	0	1,24E-18	0
ASH	kg/hr	0	26,4998	0
H ₂ S	kg/hr	0	0,8256	0
HYDROGEN	kg/hr	0	65,6314	0
NO	kg/hr	0	6,57E-13	0
NO ₂	kg/hr	0	6,61E-24	0
H ₃ N	kg/hr	0	0,0836	0

En la tabla anterior es evidente como el uso de los datos de sensibilidad para el separador de vapor de agua es decir la temperatura de 100°C y una presión de 0,87 bar, permite mejorar la producción de productos obteniendo mayor cantidad de flujos másicos de C, CO, CO₂, CH₄ y H₂, así como también disminuir la cantidad de vapor de agua saliente de 400 a 80 kg/h.

Configuración 3 (Método cinético)

Considerando los datos obtenidos es decir temperatura de 300°C y una presión de 5 bar gracias al análisis de sensibilidad se puede observar los datos tabulados presentados a continuación en la **Tabla 13**.

Tabla 13

Composiciones másicas obtenidas configuración 3.

Compuestos	Unidades	Corrientes		
		Biomasa	PET	Producto
Mass Flows	kg/hr	1000	1000	2500
H ₂ O	kg/hr	0	0	1,2936
N ₂	kg/hr	0	0	8
H ₂	kg/hr	0	0	58,8044
CO ₂	kg/hr	0	0	45,9611
CO	kg/hr	0	0	716,8910
CH ₄	kg/hr	0	0	0
C	kg/hr	0	0	925,0501
S	kg/hr	0	0	3
O ₂ S	kg/hr	0	0	0
O ₃ S	kg/hr	0	0	0
H ₃ N	kg/hr	0	0	0
NO	kg/hr	0	0	0
NO ₂	kg/hr	0	0	0
O ₂	kg/hr	0	0	741
PET	kg/hr	0	1000	0
BIOMASA	kg/hr	1000	0	0
ASH	kg/hr	0	0	0

Corrientes				
Compuestos	Unidades	Biomasa	PET	Producto
H_2S	kg/hr	0	0	0

Gracias a los datos obtenidos por el simulador, se puede resaltar que los componentes con mayor cantidad de flujo másico son C , O_2 , CO y H_2 ; seguido del CO_2 en menor cantidad, se puede notar también que las composiciones másicas de los productos H_2O , CO_2 y C han disminuido, mientras que el compuesto CO presenta un incremento de 26 kg/h con respecto a la **Tabla 11**.

Discusión de Configuraciones

En la **Tabla 14**, se muestra los resultados del proceso de pirólisis en las diferentes configuraciones. Asimismo, se muestra que la configuración 1 con el reactor Gibbs y la configuración 3 con un reactor CSTR, en el proceso de pirólisis pueden llegar a tener un gas de síntesis con mejores rendimientos en base a (H_2 , CO , CO_2).

Tabla 14

Composición en flujo másico en la corriente de gas de síntesis en cada configuración.

Compuesto	Configuración 1	Configuración 2	Configuración 3
	1	2	3
	Kg/h	Kg/h	Kg/h
H_2	65,6314	0,0002	58,8044
CO	532,7338	1297,28	716,8910
CO_2	383,5760	6,51E-12	45,9611

Compuesto	Configuración		
	1	2	3
	Kg/h	Kg/h	Kg/h
CH ₄	75,9649	11,9314	0

Con los datos obtenidos de los flujos masicos de cada una de las configuraciones muestran que la más optima es la uno, ya que el metano debe estar presente, aunque sea en menor cantidad para conformar el gas de síntesis, ya que este es la mezcla de todos estos componentes como se observa en la **Tabla 8**.

Propuesta rendimiento de obtención de gas de síntesis

Para mejorar la obtención de H₂ y CO compuestos sumamente importantes en el gas de síntesis se procedió a realizar una propuesta, en la cual se aumentaron dos reactores, en el uno se planteó reacciones de oxidación y en el otro reacciones de reducción esto con el fin de aumentar la fracción másica de los componentes.

Considerando las siguientes reacciones comunes en el proceso de la gasificación que se encuentran detalladas en la **Tabla 15**.

Tabla 15

Lista de reacciones de gasificación típicas.

No.	Reacciones	Calor de reacción (kJ/mol) T=1000 K, P=P _o	Tipo
1	$C + \frac{1}{2} O_2 \leftrightarrow CO$	-122	Reacciones
2	$CO + \frac{1}{2} O_2 \leftrightarrow CO_2$	-283	con oxígeno

No.	Reacciones	Calor de reacción (kJ/mol) T=1000 K, P=P _o	Tipo
3	$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \leftrightarrow H_2O$	-248	
4	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	138	Reacciones
5	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	-35	con agua
6	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$	206	
7	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$	171	La reacción de Boudouard
8	$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$	-74,8	Reacciones
9	$CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$	-225	de
10	$CO_2 + 4H_2 \leftrightarrow CH_4 + 2H_2O$	-190	Metanización

Nota. Obtenida de “Energy recovery from co-gasification of waste polyethylene and polyethylene terephthalate blends” (Kannan et al., 2013)

Además, se añade por último una unidad, en donde se realiza la separación de compuestos sólidos como ASH y carbono de los gaseosos que son productos de interés, para ello se hace uso de operaciones unitarias como son ciclones y separadores según corresponda.

Diagramas de flujo propuesta

A continuación, se muestra los diagramas de flujos (BFD) y (PFD) de las dos simulaciones, con la respectiva propuesta desarrolladas a las configuraciones 1 y 2; con el objetivo de mejorar la obtención de productos de gas de síntesis.

Figura 29

Diagrama de flujo de bloques del proceso de obtención configuración 1 con propuesta.

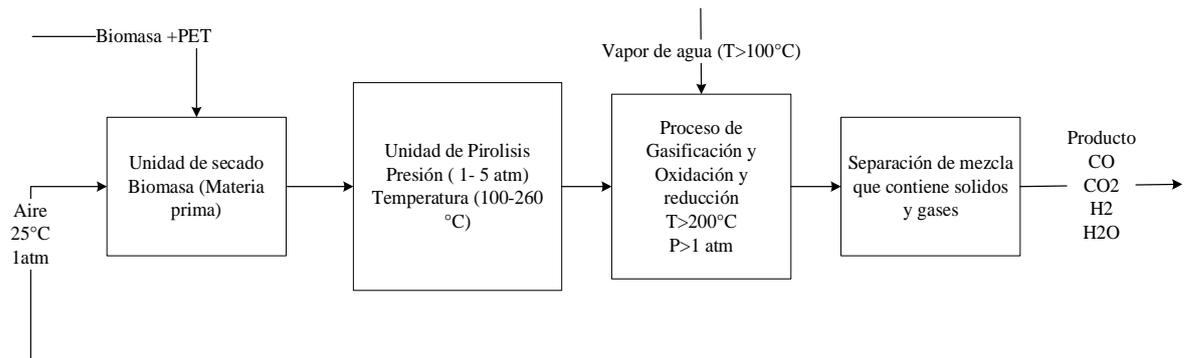
**Figura 30**

Diagrama de flujo de bloques del proceso de obtención configuraciones 2 y 3 con propuesta.

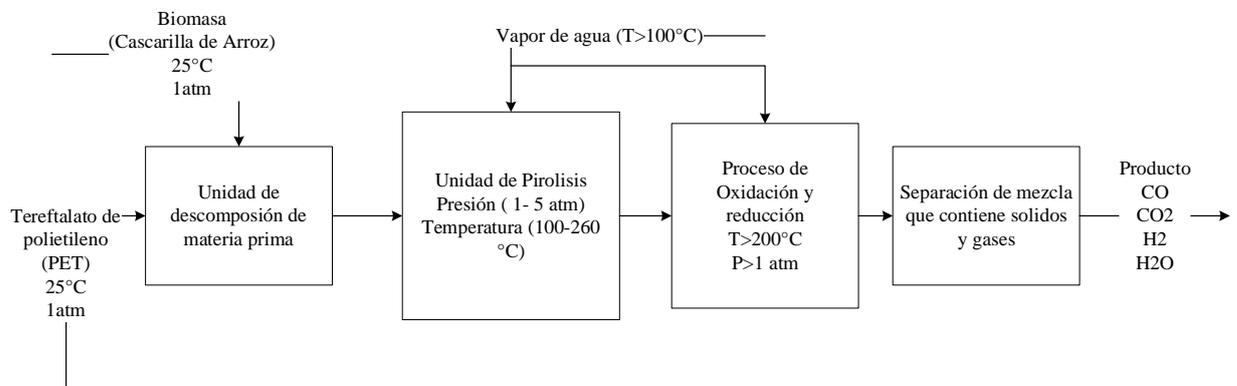


Figura 31

Diagrama de flujos del proceso para la obtención del gas de síntesis configuración 1 con propuesta

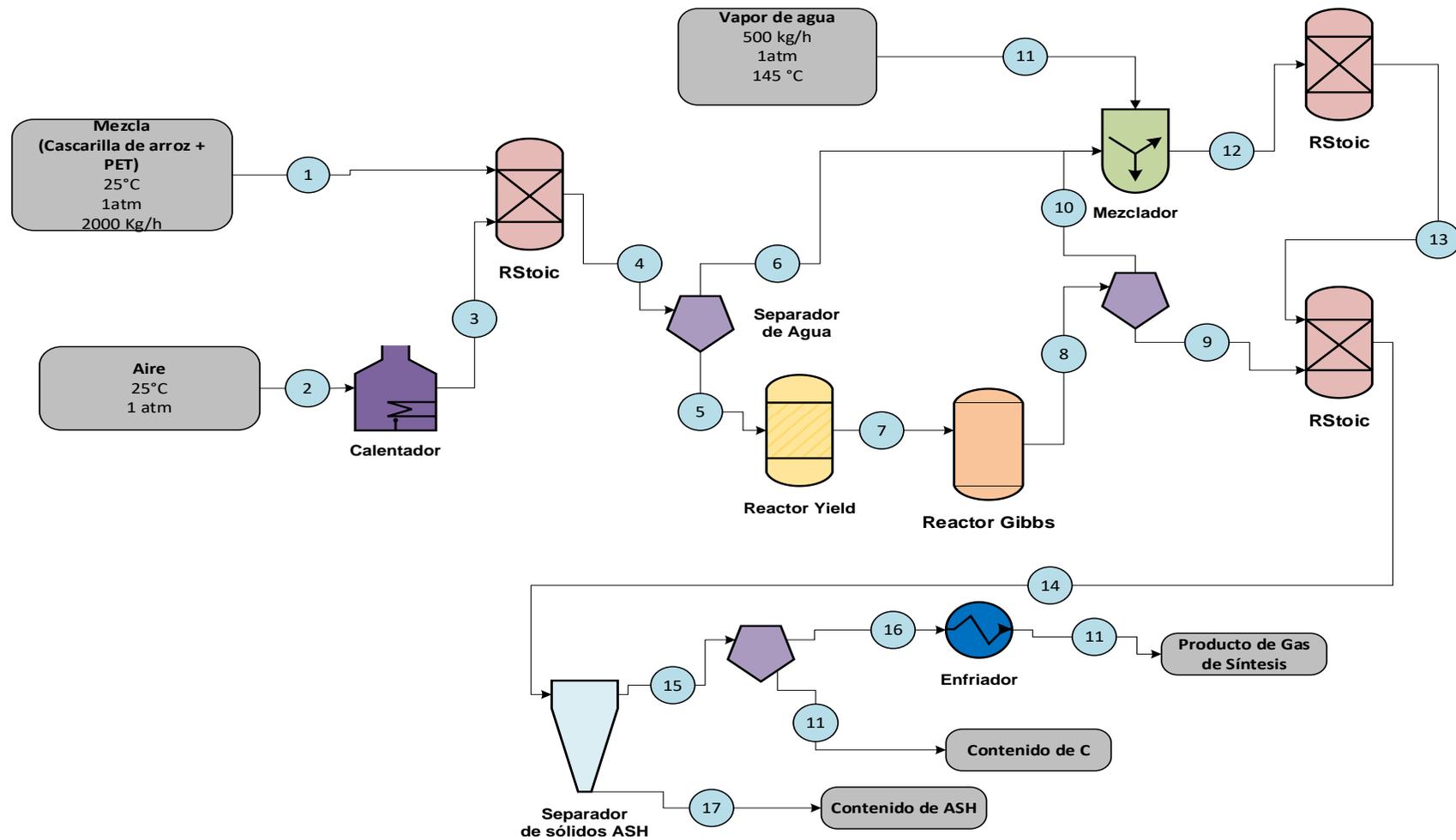
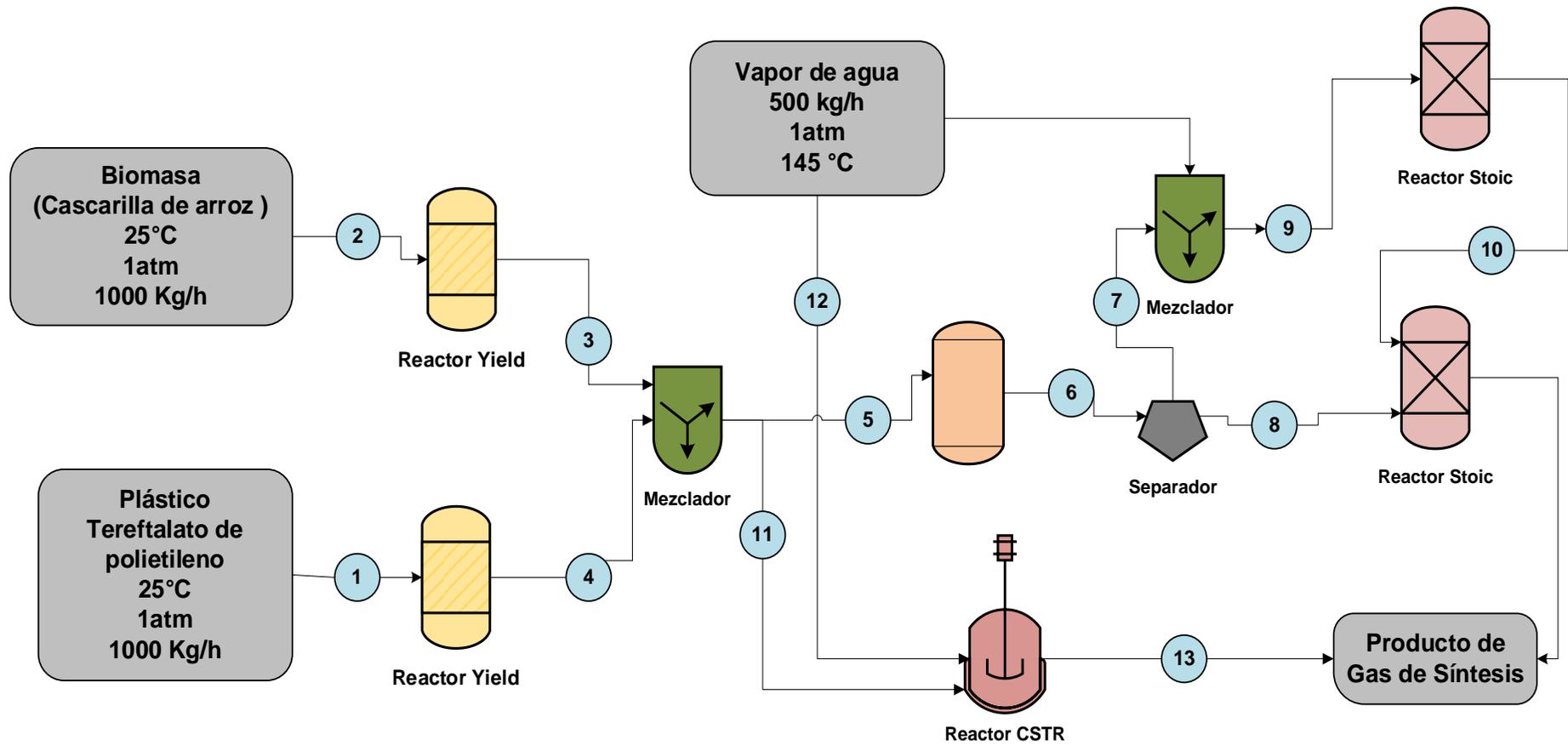
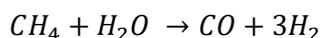


Figura 32

Diagrama de flujos del proceso de obtención del gas de síntesis configuraciones 2 y 3 con propuesta.

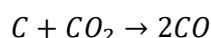


El primero reactor Rtoic, se alimenta una corriente de compuestos volátiles separados, mezclado con vapor de agua esto nos permite aumentar la fracción másica del H₂ en el gas de síntesis obtenida en el reactor Gibbs.

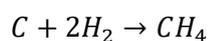


El segundo reactor Rtoic, ingresan las corrientes de los compuestos no volátiles de la unidad de pirólisis y los productos pertenecientes al primero reactor Rtoic, en donde se lleva a cabo las siguientes reacciones químicas:

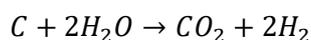
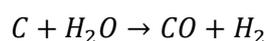
- La reacción de Boudouard



- Reacción de metalización



- Reacciones con agua:



Análisis de sensibilidad en equipos configuración 1

Análisis de sensibilidad en separador de compuestos volátiles. Este análisis se realiza con el fin de conocer las condiciones óptimas de presión y temperatura para poder separar los compuestos volátiles y no volátiles producto de la pirólisis de la biomasa para su posterior tratamiento en los reactores de oxidación y reducción para obtener la mayor cantidad de compuestos (CO, CO₂, H₂) dentro del gas de síntesis. Las **Figura 34** y **Figura 34**, muestran el análisis de sensibilidad realizado para obtener las condiciones deseadas que permitan separar el compuesto volátil de los no volátiles antes de su tratamiento en los reactores de óxido – reducción.

Figura 33

Análisis de sensibilidad unidad de separación de volátiles Presión vs Fracción másica

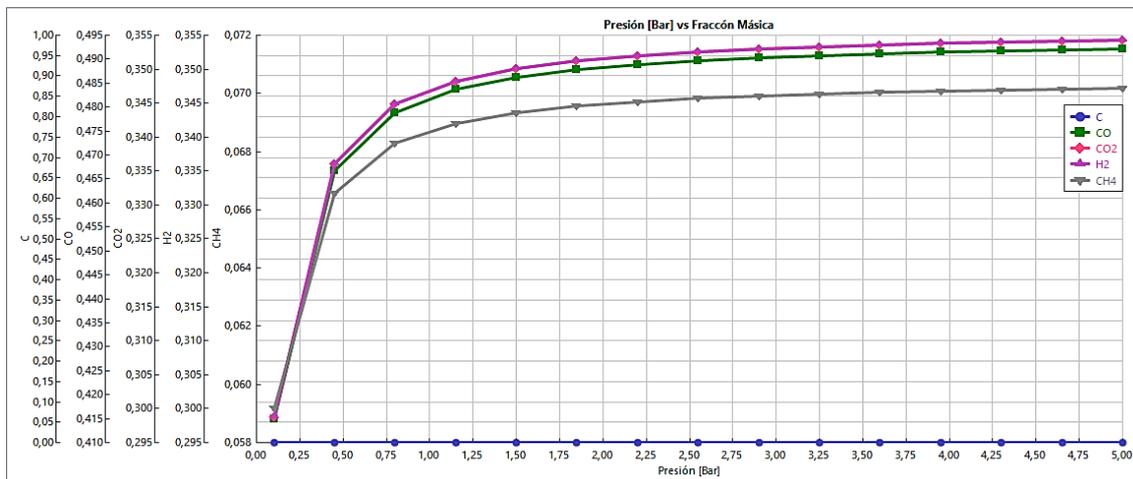
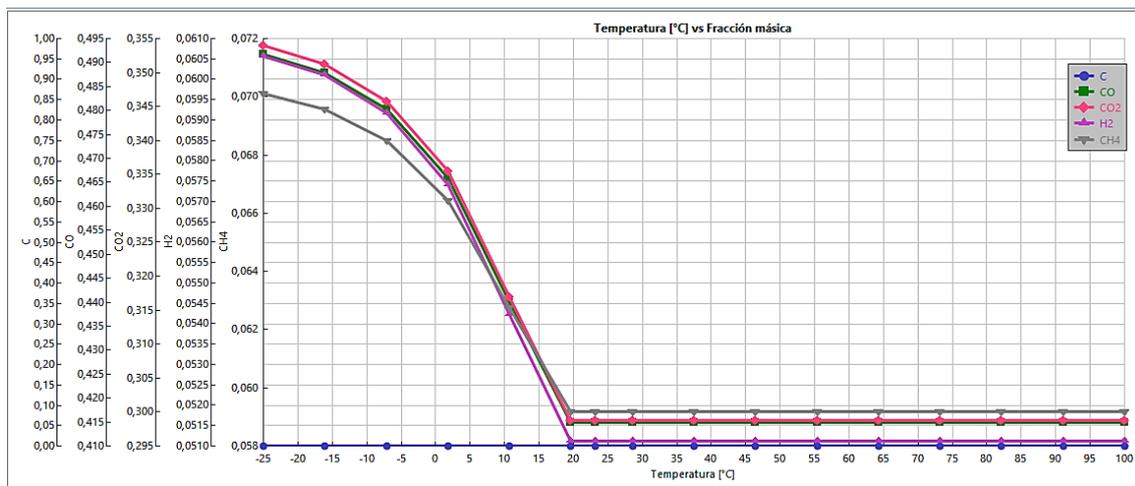


Figura 34

Análisis de sensibilidad unidad de separación de volátiles Temperatura vs Fracción másica



En las **Figura 34** y **Figura 34**, se logra observar que para tener una mayor separación de compuestos volátiles en la unidad de oxidación y reducción se necesita de temperaturas cercanas a - 25°C y Presiones cercanas a los 3,25 junto con ellos poder separar la mayor cantidad de carbono sólido producto de la pirólisis de la biomasa.

Análisis de sensibilidad en reactor de oxidación y reducción. Para conocer las conversiones en los reactores de óxido reducción se procedió a trabajar con la

herramienta Sensitivity para varias reacciones en el software de simulación de procesos químicos y con ello poder conocer las conversiones que satisfacen cada una de las reacciones de oxidación y reducción para aumentar la cantidad de H_2 , CO , CO_2 , y CH_4 en la obtención del gas de síntesis. En las **Tabla 16** y **Tabla 17** se muestra los resultados obtenidos en este análisis para conocer que conversiones satisfacen a los dos reactores con alto rendimiento en la obtención de gas de síntesis dentro de la simulación.

Tabla 16

Conversiones y flujos molar de los producto configuración 1.

Conversión		Componentes			
Reacción 1	Reacción 2	H_2	CO	H_2O	CO_2
0	0	0,035215	0,28584	0,422167	0,205809
0	0,5	0,042897	0,321422	0,399282	0,205809
0	1	0,05058	0,357005	0,376397	0,205809
0,5	0	0,045501	0,14292	0,330247	0,430364
0,5	0,5	0,053183	0,178502	0,307361	0,430364
0,5	1	0,060865	0,214085	0,284476	0,430364
1	0	0,055786	0	0,238326	0,654918
1	0,5	0,063469	0,035582	0,21544	0,654918
1	1	0,071151	0,071165	0,192555	0,654918
0,1	0,99	0,052483	0,327709	0,35847	0,25072

En el presente análisis de sensibilidad se observa las conversiones para el reactor OXIDC, para obtener la mayor cantidad de productos, principalmente H_2 y CO , la conversión para las reacciones son 0,1 y 0,99 respectivamente como se observa en la siguiente **Tabla 16**, sin embargo, las cantidades de H_2O y CO son superiores a la del H_2 .

Tabla 17*Conversiones y Flujos molar de productos*

N°	status	Conversión				CO ₂	CO	H ₂ O	H ₂	CH ₄
1	OK	1	1	0,5	1	0,0151	0,6680	0,1415	0,0158	0,1517
2	OK	1	1	1	0	0,0915	0,5874	0,1308	0,0124	0,1700
3	OK	1	1	1	0,5	0,0756	0,5492	0,1684	0,0013	0,1977
4	OK	1	1	1	1	0,0674	0,5296	0,1877	0	0,1943
5	OK	0,2	0,1	0,01	0,3	0,2792	0,5343	0,0112	0,0676	0,0035

Mediante el método de ensayo y error dentro de la simulación se logró determinar a través de la opción 5 que se observa en la **Tabla 17**, las conversiones óptimas mismas que satisfacen las 6 reacciones de óxido – reducción y que permiten obtener un gas de síntesis con un alto contenido (H_2, CO, CO_2, CH_4).

Respuesta de la configuración 1

La **Tabla 18**, muestra los resultados obtenidos en propuesta con la intención de mejora del proceso.

Tabla 18*Composiciones másicas de productos configuración 1.*

Componente	Unidad	Simulación	Simulación
		sin propuesta	con propuesta
H ₂ O	kg/hr	206,8149	27,953
N ₂	kg/hr	18,1093	18,1178
O ₂	kg/hr	2,05E-18	0,0025
BIOMASA	kg/hr	0	0
CO ₂	kg/hr	383,5760	690,841

Componente	Unidad	Simulación	Simulación
		sin propuesta	con propuesta
CO	kg/hr	532,7338	1321,5
CH ₄	kg/hr	75,9649	8,90538
C	kg/hr	609,7602	0
S	kg/hr	0	0
SO ₂	kg/hr	1,16E-08	1,16E-08
SO ₃	kg/hr	1,24E-18	0
ASH	kg/hr	26,4998	0
H ₂ S	kg/hr	0,8256	0,8255
H ₂	kg/hr	65,6314	167,4
NO	kg/hr	6,57E-13	0
NO ₂	kg/hr	6,61E-24	0
H ₃ N	kg/hr	0,0836	0

En la **Tabla 18**, se puede observar un aumento del 155 % para el Hidrógeno; 80% para el CO₂; 148% para el CO y lo cual indica que la propuesta de mejora aplicada al proceso de obtención de gas de síntesis es factible ya que adicional al aumento del porcentaje de componentes (CO, CO₂, H₂) se logra observar el consumo total del Carbono y la eliminación de un 86 % de vapor de agua en el gas de síntesis, así como también el consumo del 88% de CH₄.

Análisis de sensibilidad equipos de la configuración 2

Análisis de sensibilidad en reactor de oxidación y reducción. Asimismo, para la segunda configuración para conocer las conversiones en los reactores de óxido reducción se procedió a trabajar nuevamente con la herramienta Sensitivity para varias reacciones en software de simulación de procesos químicos y con ello poder

conocer las conversiones que satisfacen cada una de las reacciones de oxidación y reducción para aumentar la cantidad de H_2 , CO , CO_2 , y CH_4 en la obtención del gas de síntesis. En las **Tabla 19** y **Tabla 20**, se muestra los resultados obtenidos en este análisis para conocer que conversiones satisfacen a los dos reactores con alto rendimiento en la obtención de gas de síntesis dentro de la simulación para la configuración 2.

Tabla 19

Determinación de la conversión para la unidad de oxidación

N°	status	Conversión			H ₂	CO	CO ₂	CH ₄
1	OK	0	0	0	6,83E-09	0,7127	0	0,0065
2	OK	0	0,5	0	0,0256	0,3563	0,5599	0,0065
3	OK	1	0	0	0,0024	0,7241	0	0
4	OK	1	0,5	0	0,0281	0,3678	0,5599	0
5	OK	0,25	0,1	0	0,0057	0,6442	0,1119	0,0049

Tabla 20

Determinación de la conversión para la unidad de reducción

N°	Status	Conversión			H ₂	CO	CO ₂	CH ₄
1	OK	0	0	0	0,0057	0,6442	0,1119	0,0049
2	Error	1	0	1	0,0057	0,6442	0,1119	0,0049
3	Error	1	1	0	0,0057	0,6442	0,1119	0,0049
4	Error	1	1	1	0,0057	0,6442	0,1119	0,0049
5	OK	0,1	0,1	0,18	0,0057	0,6442	0,1119	0,0049

Los resultados más factibles para las unidades de conversión en el reactor de oxidación para la reacción 1 se debe colocar una conversión de 0,25 y para la reacción 2 el valor de 0,1. En el reactor de reducción se puede observar 3 valores con error

esto nos indica que para esos valores de conversión no existen los reactivos necesarios para que se den las tres reacciones propuestas en este reactor por lo tanto se procede a seleccionar el punto 5 de la **Tabla 20** esto con el fin de maximizar la cantidad de Hidrógeno, Monóxido de carbono, Dióxido de carbono y metano en el gas de síntesis.

Respuesta de la configuración 2

Para mejorar la obtención de H_2 y CO componentes sumamente importantes en el gas de síntesis dentro de la configuración 2, se procedió a realizar una propuesta en la cual se aumentaron dos reactores uno en el cual plantearon reacciones de oxidación y otro en el cual se plantearon de igual manera reacciones de reducción esto con el fin de aumentar la fracción másica de los componentes más importantes del gas de síntesis. La **Tabla 21**, indica los flujos másicos obtenidos luego de aplicar la propuesta para mejorar el proceso.

Tabla 21

Composición del gas de síntesis en la configuración 2.

Componente	Unidad	Simulación	Simulación
		sin propuesta	con propuesta
H ₂ O	kg/hr	0	107,331
N ₂	kg/hr	8	0
H ₂	kg/hr	1,2436E-05	44,6889
CO ₂	kg/hr	2,70821E-14	4,56293
CO	kg/hr	1297,28	1902
CH ₄	kg/hr	11,935	8,95124
C	kg/hr	679,784	0
S	kg/hr	2,99102	0

Componente	Unidad	Simulación	Simulación
		sin propuesta	con propuesta
SO ₂	kg/hr	0	0
SO ₃	kg/hr	0	0
H ₃ N	kg/hr	1,23635E-12	0
NO	kg/hr	2,2923E-22	0
NO ₂	kg/hr	0	0
O ₂	kg/hr	0	0
PET	kg/hr	0	0
BIOMASA	kg/hr	0	0
ASH	kg/hr	0	0
H ₂ S	kg/hr	0,0095397	0

En la **Tabla 21** se puede observar un aumento increíble para el hidrógeno y para el CO₂; 47% para el CO y lo cual indica que la propuesta de mejora aplicada al proceso de obtención de gas de síntesis es factible ya que adicional al aumento del porcentaje de componentes (CO, CO₂, H₂) se logra observar el consumo total del carbono y en esta configuración el vapor de agua aumenta debido a las reacciones presentadas en la unidad de óxido – reducción para lo cual se procede a aumentar un separador luego de esta unidad para eliminar este vapor de agua y recircularlo al mezclador, por otro lado existe una disminución del 25% de CH₄.

Discusión de la configuración con los mejores resultados

Mediante la propuesta realizada y el análisis de sensibilidad, se logró encontrar mayor cantidad de productos pertenecientes al gas de síntesis en las tres configuraciones. Considerando las temperaturas, presiones y conversiones óptimas

tabuladas anteriormente. La siguiente muestra los resultados obtenidos para una alimentación total de 2000 kg/h de materia prima en una relación estequiométrica.

Tabla 22

Flujo másico de las configuraciones

		Elementos de interés		
Compuestos	Unidades	Configuración	Configuración	Configuración
		1	2	3
CO	kg/h	1321,5	1902	716,891
H ₂	kg/h	167,4	44,6889	58,8044
CO ₂	kg/h	690,841	4,5629	45,9611
CH ₄	kg/h	8,90538	8,95124	0
H ₂ O	kg/h	27,953	107,331	1,29366

Según la **Tabla 22**, se puede observar que la configuración con mayor cantidad de productos deseados es la dos, en base a la obtención de mayor cantidad de los compuestos, al fijarnos en el rendimiento del H₂ se puede optar por la configuración 1 que se puede obtener más a diferencia de las demás, junto con el CO que su cantidad es relativamente importante.

Balance de energía para conocer que configuración tiene un menor gasto de Energía

Tabla de balance de energía en cada configuración

En la configuración es propuestas para la obtención de gas de síntesis con la maximización de obtención de este se utilizaron varios equipos, la energía de estos requeridas para la obtención del gas en cada proceso se muestra en la siguiente

Tabla 23.

Tabla 23

Energía utilizada para la obtención de gas de síntesis.

Equipo	Cantidad	Configuración			Configuración	Configuración
		1[cal/s]	2[cal/s]	3[cal/s]		
Calentador	1	0	0	0	0	0
Secador	1	0	0	0	0	0
Mezclador	1	2	2	0	0	0
Reactores	5	5	3	1944895	20922350	4523720
Separador de sólidos	1	1	0	0	1	0
Enfriador	1	0	0	52736	0	0
Separadores	3	1	0	58500	2559943	0
Total	13	9	5	2056131	23482294	4523720
Total [kw/h]				8608,61	98315,67	18993991

Se observa que cada configuración para el proceso de obtención de gas de necesita de un valor mayor a 8000 kW siendo la más factible la primera configuración con 8608,61 kW lo cual es un gran beneficio en el tema de ahorro de energía. Con ellos se logra observar que la primera configuración es más factible en el tema de energía, pero la segunda configuración como se muestra en la es la mejor para obtener un mayor rendimiento en la producción de gas de síntesis

Simulaciones en el software de simulación de procesos químicos

Figura 35.

Simulación del proceso químico configuración 1

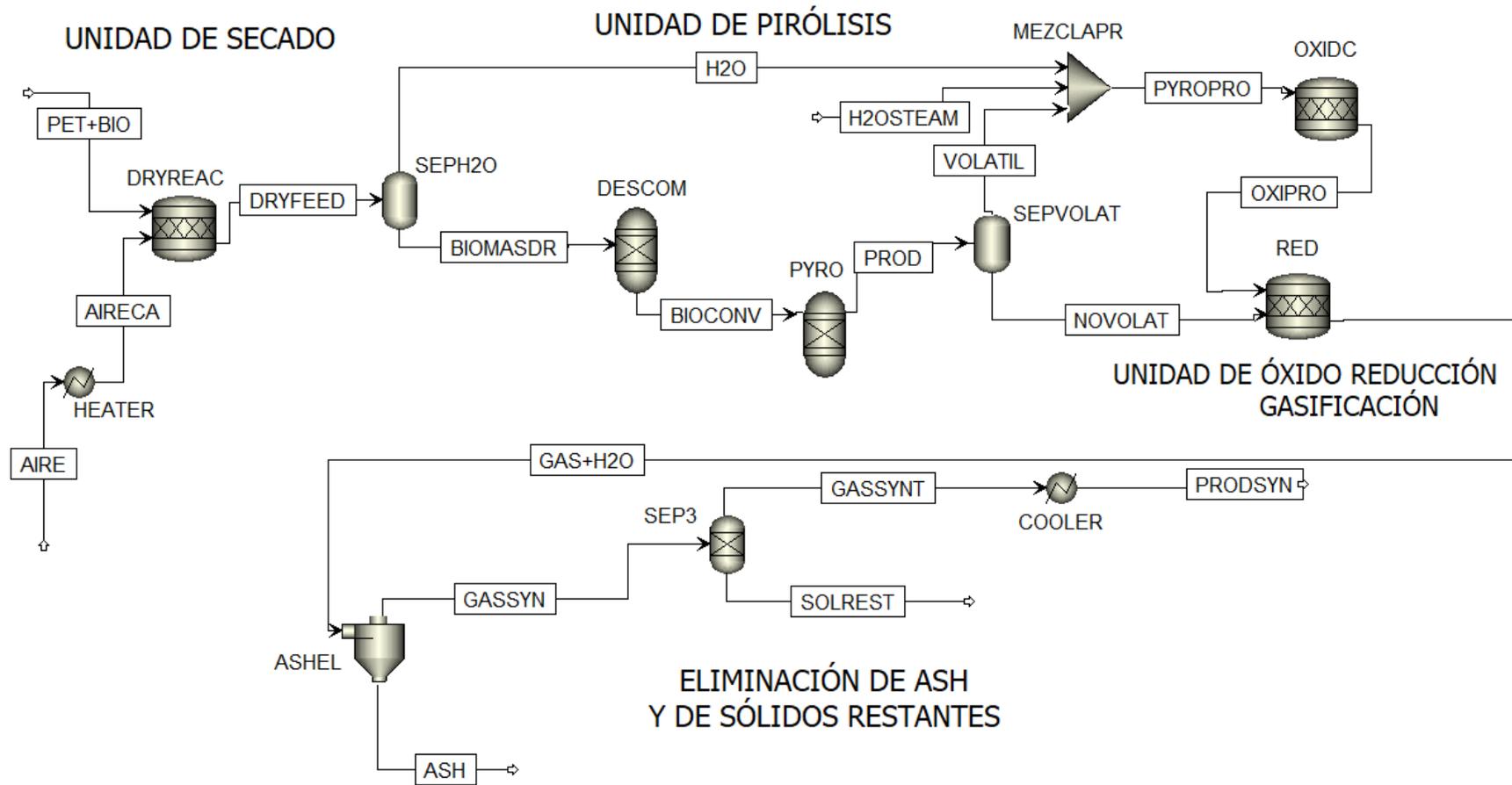
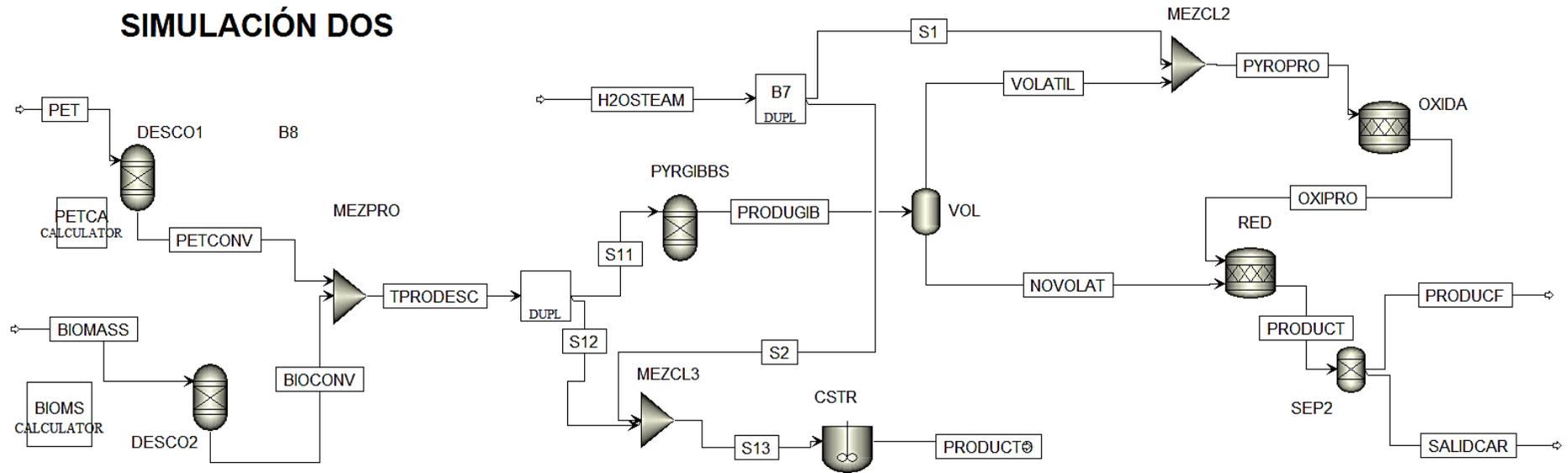


Figura 36.

Simulación del proceso químico configuración 2 y 3.



Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Para el proceso de producción de gas de síntesis se logra plantear los diagramas de flujo (PFD y BFD), con las unidades de operación necesarias y a las condiciones adecuadas que satisfacen la producción de gas de síntesis.

Al realizar las diferentes configuraciones antes de su propuesta se pudo observar que la configuración con mayor cantidad de productos deseados y que cumple con los rangos de las fracciones másicas de la composición de un gas de síntesis es la uno, no obstante, en esta se obtiene mayor cantidad de CO_2 . Por otro lado, el carbono presenta un flujo másico superior a todos los demás, él cual se puede realizar un aprovechamiento en el proceso mismo.

Se puede notar mediante los análisis de sensibilidad, realizada en los equipos de la configuración uno, que para el separador de agua las condiciones óptimas son a una temperatura de $100^{\circ}C$ y una presión de 0,87 bar; para el reactor Gibbs la temperatura para obtener una mezcla de CO , CO_2 , H_2 y CH_4 , se puede lograr en un rango de temperaturas de ($300-400^{\circ}C$); y en los reactores de óxido-reducción presentan una conversión en sus reacciones de (0,1 y 0,99) para el de oxidación y (0,2; 0,1; 0,1 y 0,1) para el de reducción.

El análisis de sensibilidad realizado en la configuración dos, mostró que las condiciones de conversión óptimas en las reacciones en los reactores de óxido-reducción son (0,25; 0,1) y (0,1;0,1;0,18) respectivamente. Mientras que en la configuración tres, el análisis de sensibilidad en el reactor CSTR señala que la temperatura y la presión óptima de operación es de 5 bar y $300^{\circ}C$.

Al llevar a cabo la propuesta en la configuración uno, se pudo presentar un aumento del 155% para el Hidrógeno; 80% para el CO_2 ; 148% para el CO y lo cual

indica que la propuesta de mejora aplicada al proceso de obtención de gas de síntesis es factible, ya que adicional al aumento del porcentaje de componentes (CO , CO_2 , H_2) se logra determinar un consumo total del Carbono y la eliminación de un 86 % de vapor de agua en el gas de síntesis y también el 88% del metano.

Con la propuesta en la configuración dos, se pudo verificar un aumento total del hidrógeno y para el CO_2 ; así también hubo un incremento del 47% para el CO , y lo cual se logra evidenciar que la propuesta es factible, ya que adicional al aumento del porcentaje de componentes (CO , CO_2 , H_2) se consiguió el consumo total del Carbono y en esta configuración el vapor de agua aumenta debido a las reacciones presentadas en la unidad de óxido – reducción y por lo tanto existió un consumo del metano del 25%.

La configuración con mayor ahorro energético según los datos tabulados es la primera con 8608,61 kW en relación con los demás que poseen mayor consumo de energía, así como también es la configuración óptima que permite la obtención de mayor cantidad de H_2 , producto de gran importancia para la industria química.

Las configuraciones 2 y 3 están diseñadas para el ingreso de cualquier tipo de biomasa y/o plásticos (conociendo sus atributos proxanal, ultanal y sulfanal), puesto que tiene dos corrientes de alimentación, por lo que se podría analizar otros plásticos con mayor porcentaje de reciclaje como HDPE, PP, LDPE, PVC, etc., para su aprovechamiento para la obtención de nuevos productos y energía renovable.

Varios estudios realizados de copirólisis de biomasa y residuos plásticos, han demostrado que los dos materiales se comportan como un agente activante para mejorar el rendimiento de obtención de gas de síntesis a diferencia de hacerlo individualmente, esto es debido a que ciertas biomásas actúan como catalizar a ciertos plásticos.

Recomendaciones

Es importante reconocer que, para optimizar la obtención de gas de síntesis, a través de procesos de pirólisis/gasificación la aplicación de un catalizador es un factor clave, junto con el aumento de las temperaturas; los catalizadores más usados para este proceso suelen ser zeolitas o Ni/SiO_2 . El catalizador promueve la producción de hidrógeno y monóxido de carbono.

Se puede realizar un análisis usando otros tipos de reactor para conocer su rendimiento tanto en la producción como en el consumo de energía; reactores como reactor tubular (RPlug) y reactores Bach.

Las corrientes que se realiza la separación de carbono se podría realizar una realimentación al proceso de reducción o al reactor de pirólisis, para un mayor aprovechamiento de la corriente, por otro lado, se le puede dar otro uso como en

Bibliografía

- Abnisa, F., Mohd, W., & Wan, A. (2014). A review on co-pyrolysis of biomass : An optional technique to obtain a high-grade pyrolysis oil. *Energy Conversion and Management*, 87, 71–85. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.007>
- Adeniyi, A. G., Adewoye, L. T., & Ighalo, J. O. (2018). *Computer Aided Simulation of the Pyrolysis of Waste Lubricating Oil Using Aspen Hysys*. 52–57. <https://doi.org/10.5755/j01.erem.74.2.20537>
- Aging, T., Panowicz, R., Konarzewski, M., Durejko, T., Szala, M., & Łazi, M. (2021). Properties of Polyethylene Terephthalate (PET) after Thermo-Oxidative Aging. *Materials*, 14(14), 3833.
- Al-Malah, K. I. M. (2017). *Aspen Plus Chemical Engineering Applications*.
- Anastas, P., & Eghbali, N. (2010). *Green Chemistry : Principles and Practice*. 301–312. <https://doi.org/10.1039/b918763b>
- Ardila-fierro, K. J., & Hernández, J. G. (2021). *Sustainability Assessment of Mechanochemistry by Using the Twelve Principles of Green Chemistry*. 1–19. <https://doi.org/10.1002/cssc.202100478>
- Arroyo, F. R. M., & Miguel, L. J. (2020). The role of renewable energies for the sustainable energy governance and environmental policies for the mitigation of climate change in ecuador. *Energies*, 13(15). <https://doi.org/10.3390/en13153883>
- Axelsson, L., Franzén, M., Ostwald, M., Berndes, G., Lakshmi, G., & Ravindranath, N. H. (2012). Perspective: Jatropha cultivation in southern India: Assessing farmers' experiences. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 6(3), 246–256. <https://doi.org/10.1002/bbb>
- Ayodele, B. V., Mustapa, S. I., Ab, T., Bin, R., & Abdullah, T. (2019). *A Mini-Review on Hydrogen-Rich Syngas Production by Thermo-Catalytic and Bioconversion of*

- Biomass and Its Environmental Implications*. 7(October), 1–6.
<https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00118>
- Azeta, O., Ayeni, A. O., Agboola, O., & Elehinafe, F. B. (2021). A review on the sustainable energy generation from the pyrolysis of coconut biomass ☆. *Scientific African*, 13, e00909. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00909>
- Becker, F. G., Cleary, M., Team, R. M., Holtermann, H., The, D., Agenda, N., Science, P., Sk, S. K., Hinnebusch, R., Hinnebusch A, R., Rabinovich, I., Olmert, Y., Uld, D. Q. G. L. Q., Ri, W. K. H. U., Lq, V., Frxqwu, W. K. H., Zklfk, E., Edvhg, L. V, Wkh, R. Q., ... ح, فاطمی. (2015). Tutorial de ASPEN PLUS Introducción y modelos simples de operaciones unitarias. *Syria Studies*, 7(1), 37–72.
- Boakye, O. E. (2014). Integrated Design and Simulation of Chemical Processes. In *Implementation Science* (Vol. 39, Issue 1).
- Bredwell, M. D., Srivastava, P., & Worden, R. M. (1999). *Reactor Design Issues for Synthesis-Gas Fermentations*. 834–844.
- Chu, J., Cai, Y., Li, C., Wang, X., Liu, Q., & He, M. (2021). Dynamic flows of polyethylene terephthalate (PET) plastic in China. *Waste Management*, 124, 273–282. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.01.035>
- Cobo, V. O. (2022). *El Aprovechamiento De Los Residuos De Racimos De Frutos Vacíos (Rfv) De La Palma Africana (Elaeis*.
- Consultora, E. S. A. (2014). *Econ . RAFAEL CORREA DELGADO Richard Espinosa Guzmán , B . A . Ministro Coordinador de Producción , Empleo y Competitividad Dr . Esteban Albornoz Vintimilla Ministro de Electricidad y Energía Renovable Econ . Santiago Medina Palacios Director Ejecutivo In*.
- Crawford, R. J., & Martin, P. J. (2020). *Plastics Engineering*, fourth edition. In *Plastics Engineering, Fourth Edition*. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-00550-0>

- Eikeland, M. S., Thapa, R. K., & Halvorsen, B. M. (2015). Aspen Plus Simulation of Biomass Gasification with Known Reaction Kinetic. *Proceedings of the 56th Conference on Simulation and Modelling (SIMS 56), October, 7-9, 2015, Linköping University, Sweden, 119, 149–156.*
<https://doi.org/10.3384/ecp15119149>
- EL-Mesery, H. S., & El-khawaga, S. E. (2022). Drying process on biomass: Evaluation of the drying performance and energy analysis of different dryers. *Case Studies in Thermal Engineering, 33, 101953.* <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2022.101953>
- Foo, D. C. Y., & Elyas, R. (2017). Introduction to Process Simulation. *Chemical Engineering Process Simulation, 3–21.* <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803782-9.00001-7>
- Gusiatin, A. P. E. K. K. B. T. P. Z. M. (2016). *Biomass for biofuels* (1st ed., Vol. 1).
- Ivanković, A. (2017). Review of 12 Principles of Green Chemistry in Practice. *International Journal of Sustainable and Green Energy, 6(3), 39.*
<https://doi.org/10.11648/j.ijrse.20170603.12>
- Jyoti, A., Mishra, R., & Gupta, G. (2020). Flowchart and algorithm Basics. In Wiley-Scrivener (Ed.), *2018 International Conference on Applied Information Technology and Innovation (ICAITI)* (Issue January 2016).
- Kannan, P., Shoaibi, A. Al, & Srinivasakannan, C. (2013). Computers & Fluids Energy recovery from co-gasification of waste polyethylene and polyethylene terephthalate blends. *COMPUTERS AND FLUIDS, 88, 38–42.*
<https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2013.09.004>
- Kontogeorgis, G. M., & Folas, G. K. (2009). Thermodynamic Models for Industrial Applications: From Classical and Advanced Mixing Rules to Association Theories. In *Thermodynamic Models for Industrial Applications: From Classical and*

Advanced Mixing Rules to Association Theories.

<https://doi.org/10.1002/9780470747537>

Lewis, C. W. (1981). Biomass through the ages. *Biomass*, 1(1), 5–15.

[https://doi.org/10.1016/0144-4565\(81\)90011-1](https://doi.org/10.1016/0144-4565(81)90011-1)

Luque, R., & Speight, J. (2015). Gasification for Synthetic Fuel Production. In

Gasification for Synthetic Fuel Production. [https://doi.org/10.1016/c2013-0-16368-](https://doi.org/10.1016/c2013-0-16368-4)

4

Marco, B. A. De, Rechelo, B. S., Tótolí, E. G., Kogawa, A. C., Regina, H., & Salgado,

N. (2019). Evolution of green chemistry and its multidimensional impacts : A review. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 27(1), 1–8.

<https://doi.org/10.1016/j.jsps.2018.07.011>

Miranda, N. T., Filho, R. M., & Maciel, M. R. W. (2019). Sugarcane bagasse fast

pyrolysis simulation: A thermodynamic equilibrium approach. *Chemical Engineering Transactions*, 74(March), 175–180.

<https://doi.org/10.3303/CET1974030>

Mohammed, W., & Errayes, A. (2020). *Chemical Methodologies Green Chemistry :*

Principles , Applications , and Review article Green Chemistry : Principles , Applications , and Disadvantages. May.

<https://doi.org/10.33945/SAMI/CHEMM.2020.4.4>

Moog, D., Schmitt, J., Senger, J., Zarzycki, J., Rexer, K. H., Linne, U., Erb, T., & Maier,

U. G. (2019). Using a marine microalga as a chassis for polyethylene terephthalate (PET) degradation. *Microbial Cell Factories*, 1–15.

<https://doi.org/10.1186/s12934-019-1220-z>

Nishinaga, To. (2015). Organic redox systems (Synthesis, Properties, and applications). In *Syria Studies* (Vol. 7, Issue 1).

- Obafemi, O., Stephen, A., Ajayi, O., & Mashinini, P. (2018). *Experimental investigation of thermal properties of Lignocellulosic biomass : A review Experimental investigation of Lignocellulosic biomass : A review thermal properties of.* <https://doi.org/10.1088/1757-899X/413/1/012054>
- Ojeda Paredes, A. (2018). Simulación de un reactor para devolatilización de residuos lignocelulósicos de banano y rosas. In *World Development* (Vol. 1, Issue 1).
- Okolie, J. A., Nanda, S., Dalai, A. K., Berruti, F., & Kozinski, J. A. (2020). A review on subcritical and supercritical water gasification of biogenic , polymeric and petroleum wastes to hydrogen-rich synthesis gas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119(October 2019), 109546. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109546>
- Osman, A. I., Farrell, C., Al-Muhtaseb, A. H., Al-Fatesh, A. S., Harrison, J., & Rooney, D. W. (2020). Pyrolysis kinetic modelling of abundant plastic waste (PET) and in-situ emission monitoring. *Environmental Sciences Europe*, 32(1). <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00390-x>
- Portilla-Jiménez, J. G. (2022). Análisis del Marco Normativo de Economía Circular en Ecuador Orientado al Sector de los Plásticos. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 13(1), 38–47. <https://doi.org/10.29166/revfig.v13i1.3364>
- Posso, F., Siguencia, J., & Narváez, R. (2020). Residual biomass-based hydrogen production: Potential and possible uses in Ecuador. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(26), 13717–13725. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.235>
- Qi, X., Yan, W., Cao, Z., Ding, M., & Yuan, Y. (2022). *Current Advances in the Biodegradation and Bioconversion of Polyethylene Terephthalate.* 1–25.
- Ray, S., & Das, G. (2020). Process Equipment and Plant Design. In *Process*

- Equipment and Plant Design*. <https://doi.org/10.1016/c2017-0-02434-5>
- Rößger, P., Seidl, L. G., Compart, F., Hußler, J., Gräbner, M., & Richter, A. (2022). Integrating biomass and waste into high-pressure partial oxidation processes: Thermochemical and economic multi-objective optimization. *Journal of Cleaner Production*, 358, 132053. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.132053>
- Sadhan Kumar, G. (2020). *Urban Mining and Sustainable Waste Management*. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0532-4_22
- Sánchez, J., Curt, M. D., & Robert, N. (2019). Biomass Resources. In *The Role of Bioenergy in the Emerging Bioeconomy*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813056-8.00002-9>
- Schefflan, R. (2016). Teach Yourself the basics of Aspen Plus. *European University Institute*, 2, 2–5.
- Scheirs, J., & Kaminsky, W. (2006). *Wiley Series in Polymer Science Metallocene-based polyolefins Preparations, Properties and Technology Polymer-Clay Nanocomposites Dendrimers and Other Dendritic Polymers Modern Styrenic Polymers Polystyrenes and Styrenic Copolymers Forthcoming Titles Ligh.*
- Shehzad, A., Bashir, M. J. K., & Sethupathi, S. (2016). System analysis for synthesis gas (syngas) production in Pakistan from municipal solid waste gasification using a circulating fluidized bed gasifier. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1302–1311. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.042>
- Sri, R. M. M., Ravichandran, S., & Suneetha, T. B. (2021). *Benefits of green chemistry*. 8(1), 70–72.
- Suriapparao, D. V., Kumar, D. A., & Vinu, R. (2022). Microwave co-pyrolysis of PET bottle waste and rice husk: effect of plastic waste loading on product formation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 49, 101781.

<https://doi.org/10.1016/J.SETA.2021.101781>

Syvitski, J., Waters, C. N., Day, J., Milliman, J. D., Summerhayes, C., Steffen, W., Zalasiewicz, J., Cearreta, A., Gałuszka, A., Hajdas, I., Head, M. J., Leinfelder, R., McNeill, J. R., Poirier, C., Rose, N. L., Shotyk, W., Wagreich, M., & Williams, M. (2020). Extraordinary human energy consumption and resultant geological impacts beginning around 1950 CE initiated the proposed Anthropocene Epoch. *Communications Earth & Environment*, 1(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00029-y>

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>

Tursi, A. (2019). A review on biomass : importance , chemistry , classification , and conversion. 22, 962–979. <https://doi.org/10.18331/BRJ2019.6.2.3>

Turton, R., Bailie, R. C., Whiting, W. B., & Shaeiwitz, J. A. (2009). *Analysis, Design and Synthesis of Chemical Processes*.

Yuan, X., Lee, J. G., Yun, H., Deng, S., Kim, Y. J., Lee, J. E., Kwak, S. K., & Lee, K. B. (2020). Solving two environmental issues simultaneously: Waste polyethylene terephthalate plastic bottle-derived microporous carbons for capturing CO₂. *Chemical Engineering Journal*, 397(February), 125350. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125350>

Anexos