



“Desarrollo y evaluación de la reacción de pirólisis de policarbonato (PC) junto con biomasa para la obtención de gas de síntesis mediante un software de simulación”

Cando Chicaiza, Verónica Marisol

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Petroquímica

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

Ing. Sayavedra Delgado, Jonathan Javier. Msc

24 de febrero del 2022

Latacunga

Reporte de verificación de contenido



JONATHAN JAVIER
SAYAVEDRA DELGADO

Identical Words	351
Words with Minor Changes	125
Paraphrased Words	0
Omitted Words	1813



JONATHAN JAVIER
SAYAVEDRA DELGADO

Ing. Sayavedra Delgado, Jonathan Javier. Msc

C.C.: 0502865850



Departamento de ciencias de la energía y mecánica

Carrera de Petroquímica

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de integración curricular: **“Desarrollo y evaluación de la reacción de pirólisis de policarbonato (PC) junto con biomasa para la obtención de gas de síntesis mediante un software de simulación ”** fue realizado por la señorita **Cando Chicaiza, Verónica Cando**, 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, 8 de agosto del 2022



Escanned with CamScanner
JONATHAN JAVIER
SAYAVEDRA DELGADO

Ing. Sayavedra Delgado, Jonathan Javier. Msc

C.C.: 0502865850



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE PETROQUÍMICA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, Cando Chicaiza, Verónica Marisol, con cédula de ciudadanía n°0550316558, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de Unidad de Integración Curricular:

"Desarrollo y evaluación de la reacción de pirólisis de policarbonato (PC) junto con biomasa para la obtención de gas de síntesis mediante un software de simulación" es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas

Latacunga, 8 de agosto del 2022

Cando Chicaiza, Verónica Marisol

C.C.:0550316558



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE PETROQUÍMICA

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, Cando Chicalza, Verónica Marisol, con cédula de ciudadanía n°0550316558, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el presente trabajo de Unidad de Integración Curricular: "Desarrollo y evaluación de la reacción de pirólisis de policarbonato (PC) junto con biomasa para la obtención de gas de síntesis mediante un software de simulación", en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios es de mi responsabilidad.

Latacunga, 8 de agosto del 2022

Cando Chicalza, Verónica Marisol

C.C.:05503165

DEDICATORIA

A Dios por su protección y fuerza para lograr mis metas, a mis padres y a mi madrina, por su apoyo y amor incondicional

AGRADECIMIENTOS

A Dios por estar siempre en los momentos de mi vida, guiándome, cuidándome y dándome la fortaleza en los días que estado por rendirme. A mis padres Wilmer y Luz por la enseñanza, amor y esfuerzo por verme triunfar, todo se los debo a mi familia. Gracias por creer en mí.

A mi madrina por los consejos y la ayuda que me ha brindado en el transcurso de mi vida.

A mi tutor, Ing. Javier Sayavedra Delgado por transmitirme sus conocimientos y por su don de enseñanza. Gracias por brindarme su guía para el desarrollo de este trabajo de titulación.

A toda mi familia, por creer en mí y darme aliento para conseguir mis metas.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Caratula	1
Reporte de verificación de contenido.....	2
Certificación	3
Responsabilidad de autoría	4
Autorización de publicación	5
Dedicatoria	6
Agradecimientos.....	7
Índice de contenido	8
Índice de tablas	12
Índice de figuras	13
Resumen.....	15
Abstract	16
Capitulo I: Introduccion.....	17
Antecedentes.....	17
Planteamiento del problema.....	18
Justificación e importancia	18
Objetivos.....	20
<i>Objetivo general.....</i>	20
<i>Objetivos Específicos.....</i>	21
Hipótesis	21
Variables de investigación.....	21

<i>Variable dependiente</i>	21
<i>Variables independientes</i>	21
Capítulo II: Marco teórico	22
Gas de síntesis	22
Biomasa	22
<i>Descripción</i>	22
<i>Composición de la biomasa</i>	22
<i>Clasificación de la biomasa</i>	23
Polímeros	23
<i>Clasificación de los polímeros</i>	24
Métodos de degradación de los plásticos	24
<i>Degradación fotooxidativa</i>	24
<i>Degradación térmica</i>	25
<i>Degradación inducida por ozono</i>	25
<i>Degradación macanoquímica</i>	25
<i>Degradación catalítica</i>	25
<i>Biodegradación</i>	25
<i>Pirólisis</i>	26
Simulación de procesos	26
<i>Simuladores de procesos químicos</i>	26
Reactores	27
Reformado con vapor	28
Horno	28

Química verde.....	29
<i>Los 12 principios de la química verde.....</i>	<i>29</i>
Capítulo III: Metodología.....	31
Demanda de biomasa y policarbonato en el Ecuador	31
Descripción general del proceso	31
<i>Materias primas.....</i>	<i>31</i>
<i>Pirólisis del policarbonato (PC).....</i>	<i>31</i>
<i>Descomposición de la biomasa mediante la pirólisis térmica</i>	<i>34</i>
<i>Composición de la cáscara de cacao.....</i>	<i>35</i>
Procesos para la obtención del gas de síntesis.....	35
<i>Sección del horno de pirólisis</i>	<i>35</i>
<i>Sección del proceso de separación</i>	<i>35</i>
<i>Reformado de vapor</i>	<i>36</i>
Descripción de las operaciones unitarias utilizadas en la simulación.....	36
<i>Reactor PFR</i>	<i>36</i>
<i>Filtro.....</i>	<i>36</i>
<i>Destilación flash</i>	<i>36</i>
Diagrama de proceso	37
<i>Diagrama de flujo.....</i>	<i>37</i>
Especificaciones de diseño del reactor	38
Reacciones presentes en el proceso de pirólisis del policarbonato	38
<i>Reacción química del policarbonato</i>	<i>39</i>
Reacciones presentes en el proceso de pirólisis de la biomasa.....	39

<i>Parámetros cinéticos</i>	40
Simulación	41
<i>Ingreso de componentes no disponibles en el simulador</i>	41
<i>Selección del modelo termodinámico</i>	49
<i>Proceso de pirólisis</i>	49
<i>Separación de la fase líquida y gaseosa</i>	51
<i>Proceso de reformado catalítico</i>	52
Capítulo IV: Resultados y discusiones	55
<i>Alimentación del proceso</i>	55
<i>Obtención del gas de síntesis</i>	55
<i>Balance de masa del proceso</i>	56
<i>Especificación de diseño en el reactor</i>	60
<i>Análisis de sensibilidad</i>	61
<i>Comparación de biomásas en la generación de gas de síntesis</i>	65
Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones	67
Conclusiones	67
Recomendaciones	68
Bibliografía	69
Anexos	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Rendimiento de producto de pirólisis de PC (% en peso sobre polímero)</i>	31
Tabla 2	<i>Composición de los principales gases (% en peso sobre PC)</i>	32
Tabla 3	<i>Composición de la fracción de pirólisis líquida de PC (% del área del cromatograma)</i>	33
Tabla 4	<i>Descomposición de la hemicelulosa y celulosa</i>	34
Tabla 5	<i>Descomposición de la lignina</i>	35
Tabla 6	<i>Dimensiones de los tubos</i>	38
Tabla 7	<i>Parámetros cinéticos de la biomasa</i>	40
Tabla 8	<i>Parámetros cinéticos de la descomposición del policarbonato</i>	41
Tabla 9	<i>Datos de la corriente de alimentación al reactor PFR</i>	51
Tabla 10	<i>Datos de entrada de cada equipo</i>	54
Tabla 11	<i>Flujos másicos de la alimentación</i>	55
Tabla 12	<i>Balance de masa</i>	56
Tabla 13	<i>Número de tubos obtenido en la especificación de diseño</i>	61
Tabla 14	<i>Análisis de sensibilidad del reactor de pirólisis</i>	61
Tabla 15	<i>Análisis de sensibilidad del metano y rendimiento del hidrogeno</i>	64
Tabla 16	<i>Comparación de las biomosas</i>	66
Tabla 17	<i>Balance en el reactor</i>	74
Tabla 18	<i>Balance del reactor a diferentes temperaturas</i>	75
Tabla 19	<i>Constantes obtenidas a cada temperatura</i>	77
Tabla 20	<i>Parámetros obtenidos de la ecuación de Arrhenius</i>	77
Tabla 21	<i>Determinación del flujo molar del agua</i>	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	<i>Secciones del horno.....</i>	28
Figura 2	<i>Reactor de flujo pistón.....</i>	36
Figura 3	<i>Planta de destilación flash.....</i>	37
Figura 4	<i>Diagrama de bloques del proceso para la obtención de gas de síntesis.....</i>	37
Figura 5	<i>Composición de las de la descomposición del policarbonato</i>	39
Figura 6	<i>Ventana de especificación de componente</i>	42
Figura 7	<i>Ventana User-defined.....</i>	42
Figura 8	<i>Selección de Draw/Impot/Edit structure.....</i>	43
Figura 9	<i>Ventana Molecule Editor</i>	43
Figura 10	<i>Verificar si la estructura está disponible</i>	44
Figura 11	<i>Ventana Molecule Structure</i>	44
Figura 12	<i>Formula del policarbonato.....</i>	45
Figura 13	<i>Ventana NIST.....</i>	45
Figura 14	<i>Propiedades del policarbonato</i>	46
Figura 15	<i>Estructura hemicelulosa</i>	46
Figura 16	<i>Propiedades de la hemicelulosa.....</i>	46
Figura 17	<i>Estructura simplificada de la celulosa.....</i>	47
Figura 18	<i>Propiedades de la celulosa</i>	48
Figura 19	<i>Estructura simplificada de la lignina.....</i>	48
Figura 20	<i>Propiedades de la lignina</i>	49
Figura 21	<i>Simulador del reactor</i>	50
Figura 22	<i>Separación de la fase líquida del gas.....</i>	52

Figura 23 <i>Reactor de equilibrio</i>	53
Figura 24 <i>Proceso de la obtención de gas de síntesis diseñada</i>	56
Figura 25 <i>Curva de conversión del policarbonato</i>	62
Figura 26 <i>Curva del rendimiento de gas generado</i>	63
Figura 27 <i>Curva de la conversión del metano</i>	64
Figura 28 <i>Curva del rendimiento de hidrogeno</i>	65

RESUMEN

En esta investigación se realizó el diseño de un proceso de pirólisis para la obtención de gas de síntesis a partir del residuo de policarbonato y cáscara de cacao con una relación másica 1:1, mediante el software de simulación de procesos químicos, se describió el proceso de obtención de gas de síntesis mediante un diagrama de bloques, el cual se basó en un modelado simplificado para la obtención de las reacciones del polímero, biomasa y obtención de los parámetros cinéticos. El proceso de pirólisis se llevó a cabo en un reactor “plug” con el fin de descomponer las materias primas, donde se varió el número de tubos y el diámetro externo para una conversión del 95 % del policarbonato. Se realizó un proceso de separación para separar la fracción gaseosa de la fracción líquida. El proceso de reformado con vapor, descompone a los hidrocarburos livianos en de gas de síntesis, se utilizó un intercambiador de calor para aprovechar el calor, elevando la temperatura del agua el cual ingresa con un flujo molar de 222.8 Kmol/h al reactor de equilibrio. Las condiciones de los equipos se basaron mediante una revisión bibliografía y aplicando heurísticas para obtener un alto valor de gas de síntesis como el H₂, CO, CO₂. Se realizó el análisis de sensibilidad para obtener una temperatura óptima para cada reactor con el fin de lograr mayor conversión del polímero, metano y rendimiento de gas generado. Se obtuvieron los flujos másicos de entrada y salida de los componentes en cada equipo.

Palabras claves: Pirólisis, Policarbonato, Biomasa, Reformado con vapor

ABSTRACT

In this research, a pyrolysis process was designed to obtain synthesis gas from polycarbonate and cocoa husk residue with a 1:1 mass ratio, using chemistry process simulation software, the process of obtaining synthesis gas was described by means of a block diagram, which was based on a simplified modeling to obtain the reactions of the polymer, biomass and kinetic parameters. The pyrolysis process was carried out in a plug reactor in order to decompose the raw materials, where the number of tubes and the external diameter were varied for a 95 % conversion of the polycarbonate. A separation process was carried out to separate the gaseous fraction from the liquid fraction. The steam reforming process decomposes the light hydrocarbons into synthesis gas. A heat exchanger was used to take advantage of the heat, raising the temperature of the water which enters with a molar flow of 222.8 Kmol/h to the equilibrium reactor. The equipment conditions were based on a literature review and applying heuristics to obtain a high value of synthesis gas such as H₂, CO, CO₂. Sensitivity analysis was performed to obtain an optimum temperature for each reactor in order to achieve higher polymer conversion, methane and gas yield generated. The input and output mass flows of the components in each unit were obtained.

Keywords: Pyrolysis, Polycarbont, Biomass, Steam reforming

CAPITULO I

Introducción

Antecedentes

El gas de síntesis se puede obtener mediante algunos hidrocarburos y también del carbón y del coque de petróleo, en los últimos tiempos se ha investigado para obtenerse a partir de la biomasa. El gas producido por la gasificación de biomasa contiene hidrógeno, humedad, monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano e hidrocarburos alifáticos, benceno y tolueno, en porciones pequeñas se encuentran el amoníaco, ácido clorhídrico y sulfuro de hidrógeno, para obtener el gas de síntesis se deben apartar el monóxido de carbono y el hidrógeno de esta mezcla. (Basu, 2010)

La producción de biogás se da desde hace años atrás en los países de China y la India, siendo de gran importancia para la humanidad desde principios de la historia, pero cuando inició el uso de los combustibles fósiles este ha perdido importancia, al pasar los años se ha ido agotando y generando efectos en el medio ambiente por lo que hay la necesidad de buscar otras alternativas como la utilización de los biocombustibles la cual se obtiene mediante la utilización de la biomasa, siendo la materia orgánica que se genera por un proceso biológico, natural o provocada, se lo utiliza como fuente de energía

La biomasa como por ejemplo la madera antes del siglo XX era la principal fuente al producir energía en el mundo, se usó a grandes cantidades provocado tanta deforestación en Inglaterra afectando el crecimiento industrial (Basu, 2010).

El policarbonato tiene una alta demanda en el comercio debido a las propiedades mecánicas y térmicas, resistencia al impacto y transparencia óptica (Kim & Macosko, 2009).

En los últimos años, la contaminación ambiental ha incrementado para ello empezaron a tomar medidas alarmantes como la transformación de los residuos en energía por medio de la combustión del mismo, se ha evidenciado con el mejoramiento en el medio ambiente, que se deben regir a las leyes que promueven la protección del ambiente siendo

más severas en el transcurso de los años. La química verde busca alternativas para la producción de nuevos productos así reduciendo o eliminando la producción de sustancias peligrosas (Vargas & Pimiento, 2007).

Planteamiento del problema

Aasberg-Petersen et al. (2004) menciona que el aumento de la producción de policarbonato (PC) a nivel mundial alcanzó 6 millones de toneladas métricas en el 2017, se debe considerar que es difícil de reciclar debido a la resistencia que tiene al estar en contacto con sustancias químicas. Los procesos termoquímicos como la pirólisis y la gasificación son medios para convertir la biomasa y los desechos plásticos en combustibles y también se puede obtener productos químicos de gran importancia, siendo de gran ayuda para los problemas en la producción de energía y la gestión de desechos.

En el Ecuador las importaciones de policarbonato han ido aumentando hasta 2992,66 ton/año en el año 2021, se aplica en el área principal como en los equipos electrónicos, los materiales de construcción, los discos compactos la industria automotriz/aeronáutica y los dispositivos médicos. Las propiedades que tiene se lo puede utilizar en botellas de agua potable y envases de alimentos, por lo que llama la atención el problema que ha tenido estos últimos años. La combustión directa es peligrosa debido a que expande demasiado dióxido de carbono y humo durante la descomposición de la PC obteniendo una contaminación ambiental. Una mejor opción es por medio de la pirólisis siendo una técnica prometedora y respetuosa con el medio ambiente (Apaydin-Varol et al., 2014)

Justificación e importancia

La biomasa obtenida de árboles, residuos agroforestales, pastos, plantas, plantas acuáticas y cultivos es de gran importancia en la industria química siendo materia prima renovable versátil. Mediante el proceso de fotosíntesis las plantas convierten el dióxido de carbono y el agua en bioquímicos de metabolitos primarios y secundarios. Para convertir la biomasa en energía se va a realizar mediante pirólisis que consiste en la degradación

térmica mediante calor en ausencia de oxígeno obteniendo carbón vegetal sólido, bioaceite líquido y productos combustibles gaseosos (Naik et al., 2010)

El Ecuador por su producción alta en la agrícola posee mayor extensión de cultivos tanto permanente (banano, cacao, plátano, caña de azúcar) como transitorios (maíz, arroz), en el año 2014, la producción de residuos agrícolas supera los 10 millones de toneladas, permitiendo la apertura del campo de explotación de la biomasa mediante una transformación energética a eléctrica, calor y producción de biocombustibles (Serrano et al., 2017).

El instituto Nacional de Eficiencia Energética y energía Renovable INER indica que el Ecuador posee un gran potencial de energía mediante biomasa, por tener mayor actividad agrícola y así aprovechar los residuos urbanos (Chong Obando, 2018).

La pirólisis de biomasa, carbón y las mezclas siendo una nueva área de investigación, la mayoría de investigadores han examinado la pirólisis con el objetivo de la conversión de biomasa en energía verde y en la primera fase de reacción durante la combustión de biomasa.

Según (Apaydin-Varol et al., 2014) la pirólisis de polímeros se basa en una serie de reacciones que incluye la descomposición de polímeros en volátiles condensables y no condensables de menor peso molecular, la composición y el rendimiento están influenciados por la velocidad de calentamiento, temperatura, presión, el tiempo de residencia, contenido de humedad, composición de material de biomasa y tamaño de partículas.

Para ello se va a utilizar el proceso de pirólisis que es un proceso de descomposición térmica de materiales carbonosos sólidos en contacto con un agente oxidante con el fin de formar gases denominado gas de síntesis y están acompañados de los siguientes componentes como el H_2 , CO , CO_2 e hidrocarburos ligeros, vapores

condensables como el alquitrán o aceites de pirólisis y residuos sólidos como el carbón (Aasberg-Petersen et al., 2004).

La química verde busca alternativas para el mejoramiento ambiental mediante la eliminación o reduciendo productos, procesos que se obtiene por la producción de sustancias peligrosas así protegiendo la salud humana, los principios que se va a utilizar en esta investigación son los siguientes.

Según (Vargas Afanador & Pimiento, 2007) los principios son:

- ✚ Economía atómica: los métodos de síntesis deberán diseñarse de manera que incorporen al máximo, en el producto final, todos los materiales usados durante el proceso, minimizando la formación de subproductos. Este principio se considera la relación del peso molecular del producto de una reacción o proceso en relación a la suma de los pesos moleculares de todos los reactivos.
- ✚ Utilización de materias primas renovables: la materia prima ha de ser preferiblemente renovable en vez de agotable, siempre que sea técnica y económicamente viable. Este principio se considera por el uso de la biomasa como fuente de energía.
- ✚ Potenciación de la catálisis: Se emplearán catalizadores (lo más selectivo posible), reutilizables en lo posible, en lugar de reactivos estequiométricos. Este principio se considera por el uso del catalizador para la obtención de gas de síntesis.

Objetivos

Objetivo general

Desarrollar y evaluar la reacción de pirólisis de PC junto con biomasa para la obtención de gas de síntesis

Objetivos Específicos

Determinar las condiciones óptimas de generación de mayor cantidad de productos con valor agregado

Generar balances y reacciones presentes en el reactor y demás operaciones unitarias necesarias para el proceso.

Realizar la simulación del proceso de pirólisis ocupando los datos y cálculos obtenidos en los objetivos planteados.

Hipótesis

¿Será posible la obtención del gas de síntesis a partir de la reacción de pirólisis de policarbonato junto con biomasa?

Variables de investigación***Variable dependiente***

Contenido de Gas de síntesis

Variables independientes

Tipo de biomasa

Policarbonato

CAPÍTULO II

Marco teórico

Gas de síntesis

Es un combustible gaseoso el gas natural sintético está constituido por una mezcla de hidrógeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono y otros gases que puede ser producido por otras fuentes rica en carbono mediante biomasa a través de procesos de degradación como pirólisis, co-pirólisis, gasificación e hidrolisis, que se han desarrollado a lo largo del tiempo (Rostrup-Nielsen & Christiansen, 2011).

La producción del gas de síntesis se produce para obtener amoníaco con una producción de 124 millones de toneladas por año 2006 y metanol con 33 millones de toneladas en 2005, otro uso es la obtención de hidrógeno, fertilizantes y productos químicos (Rostrup-Nielsen & Christiansen, 2011).

Biomasa

Descripción

Según Vassilev et al (2010), la biomasa es sólido orgánico-inorgánico biogenético contemporáneo no fósil se obtiene mediante procesos naturales y antropogénicos y comprende:

1. Constituyentes naturales que se obtienen a partir del cultivo de vegetación terrestre y acuática a través de la fotosíntesis o mediante la digestión de alimentos por parte de animales y humanos.
2. Productos tecnogénicos son materiales de construcción derivados del suelo y modificados por el hombre por ejemplo el ladrillo.

Composición de la biomasa

Celulosa

Es un polímero lineal de la celobiosa siendo un compuesto orgánico muy abundante en la naturaleza se los encuentra en las plantas como algas, hongos y en los

quistes de los protozoarios. Está formado por la unión de dos moléculas de glucopiranososa se conoce como disacárido (Bautista & Palacio, 2005).

Hemicelulosa

Son polímeros lineales y ramificados de hexosas, pentosas y ácidos urónicos funcionan como cementantes de las fibras de celulosa teniendo una semejanza con la celulosa por el enlace beta 1-4 (Bautista & Palacio, 2005).

Lignina

Es un polímero no uniforme, tiene un núcleo de fenilpropano, por lo que hace que la lignina tenga una resistencia a la descomposición. Para polimerizar la lignina se lo realiza mediante diversas enzimas como la polifenoloxidasas y peroxidasas que ocasiona la liberación de un compuesto aromático (Bautista & Palacio, 2005).

Clasificación de la biomasa

Según Liu et al (2021), la biomasa se clasifica en

- Madera forestal se obtiene de los procesos de la producción de la madera como: podas de parques, restos de talas, etc.
- Residuos agrícolas se obtiene de los restos de la recolección y procesado de alimento como: pajas, cultivos de bulbos, residuos de invernaderos y podas de árboles frutales.
- Cultivos energéticos son cultivos de bajo costo con el fin de producir biomasa transformable en biocombustibles y para la alimentación como: trigo, cebada, maíz, girasol, colza, remolacha, etc.

Polímeros

Un polímero es una molécula larga la cual está formado por un monómero repetitivo, se clasifican en homopolímeros y copolímeros. Los homopolímeros están formados por una sola unidad repetitiva y los copolímeros están formados por monómeros diferentes (Ebewele, 2000).

Clasificación de los polímeros

Termoplásticos

Es un polímero que se ablanda y fluye bajo la acción del calor y presión, al enfriarse el polímero toma la forma del recipiente que lo contiene por ejemplo: polietileno, poliestireno y nylon (Ebewele, 2000).

Termoestables

Es un polímero cuando se calienta sufre un cambio químico para producir un polímero reticulado, existen inicialmente como líquido se los conoce como prepolímeros se los puede dar forma aplicando presión y temperatura pero no puede sufrir de manera consecutiva cambios de ablandamiento y dureza por ejemplo: urea-formaldehído, fenol-formaldehído y epóxidos (Ebewele, 2000).

Policarbonato

Son poliéster de ácido carbónico inestables, la producción del polímero se hace reaccionar fosgeno con bisfenol A [2,2-bis(4-hidroxifenil)propano], los nombres comerciales son el Lexan (General Electric) y Merlon (Mobay), otro proceso de obtención es mediante la reacción de ésteres entre el carbonato de difenilo y bisfenol, siendo un plástico transparente de extraordinaria tenacidad, son polímeros muy estables (Seymour & Carraher, 1995).

Es un plástico consumible con aplicaciones en los mercados eléctricos y electrónicos, edificación, construcción y automatización (Mojaver et al., 2021).

Métodos de degradación de los plásticos

Degradación fotooxidativa

Es la descomposición del material por la acción de la luz, la mayoría de los polímeros sintéticos son susceptible a la degradación por la luz UV y visible. La degradación del

polímero comienza en las partes del éter de los segmentos blandos, donde la fotoirradiación genera grupos terminales éster, aldehído, formiato y propilo (Singh & Sharma, 2008).

Degradación térmica

Tanto la degradación fotoquímica y térmica son similares a condiciones normales se clasifican como degradación oxidativa, se diferencian por la secuencia. La degradación térmica de los polímeros se produce a través de la degradación aleatoria y en cadena iniciada por la luz térmica y ultravioleta (Singh & Sharma, 2008).

Degradación inducida por ozono

El ozono atmosférico suele provocar la degradación de los polímeros en condiciones que pueden considerarse normales; cuando otros procesos de envejecimiento oxidativo son muy lentos y el polímero conserva sus propiedades durante más tiempo. La presencia en el aire, incluso en concentraciones muy pequeñas, acelera notablemente el envejecimiento de los materiales poliméricos (Singh & Sharma, 2008).

Degradación macanoquímica

Es la degradación del polímero bajo estrés mecánico y por fuentes irradiaciones ultrasónicas. La descomposición de la cadena mediante la fuerza mecánica a menudo se ve favorecida por una reacción química y se conoce como degradación macanoquímica (Singh & Sharma, 2008).

Degradación catalítica

La transformación catalítica de polímeros residuales en hidrocarburos con mayor valor comercial es un campo de gran interés. Las poliolefinas se degradan térmicamente o catalíticamente en gases y aceites. Los catalizadores ayudan a mejorar la calidad de los productos obtenidos, baja la temperatura de descomposición, permite conseguir una determinada selectividad a un determinado producto (Singh & Sharma, 2008).

Biodegradación

Es una transformación bioquímica de compuestos en mineralización por microorganismos. Los productos obtenidos mediante medio es dióxido de carbono y agua en condiciones

aeróbica y metano y dióxido de carbono en condiciones anaeróbicas (Singh & Sharma, 2008).

Pirólisis

Es la descomposición de la materia orgánica mediante un proceso en la atmósfera inerte o al vacío por medio de la traslación de energía en forma de calor, la reacción al producirse se obtiene un residuo carbonoso, gas condensables, y productos gaseosos (Nogués et al., 2010).

Implica la descomposición térmica anaeróbica de sólidos carbonosos mediante la producción de gas de síntesis obteniendo H_2 , CO , CO_2 , hidrocarburos ligeros, vapores condensables como el alquitrán o también conocido como el aceite de pirólisis y residuos sólidos como el carbón (Liu et al., 2021).

Simulación de procesos

Es una técnica con el fin de evaluar rápido un proceso mediante una representación del mismo a base de modelos matemáticos, se lo realiza mediante la utilización de computadora permitiendo tener una idea del proceso. El número de las variables pueden ser tan grande como 100000 en una planta de procesos químicas y el número de ecuaciones no lineales que se pueden resolver puede ser de 1000, siendo la mejor solución la resolución de un problema por medio de una computadora (Martinez et al., 2000).

Simuladores de procesos químicos

Es un software que se utiliza para moldear el comportamiento en estado estacionario de un proceso o sistema mediante el cálculo de presión, temperatura y flujo. Para una simulación de un proceso de manufactura completa, los flujos de masa y de energía indican por medio de iconos el flujo que ingresa o se retira de la operación unitaria (Quiñonez & Zevallos, 2021).

ASPEN PLUS

Es un programa muy usado por la facilidad de modelar procesos químicos mediante cálculos complejos, equipos, estadísticas con el objetivo de obtener rendimientos de los compuestos resultantes, tiene un base de datos extensa en los parámetros de física y químicas de las especies puras y combinadas, modelos termodinámicos, procesos complejos (Antón Loor & Torres Bustos, 2020).

Simulador POR/II

Es un simulador de procesos de estado estacionario para el diseño de procesos y el análisis operativo para ingenieros de procesos en las industrias de procesamiento químico y polímeros. Incluye una biblioteca de componentes químicos, métodos de predicción de propiedades termodinámicas y operaciones como intercambiadores de calor, compresores, columna de destilación y reactores que se encuentran en la industria de procesamiento químico (Ghasem, 2011).

SuperPro Designer

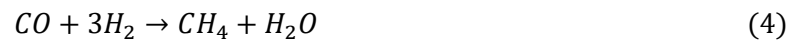
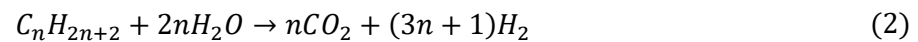
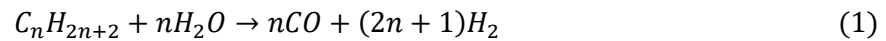
Es un simulador de procesos que se encarga de los medioambientales como el tratamiento de aguas residuales, el control de la contaminación del aire, la minimización de residuos y la prevención de la contaminación. Proporciona un modelo general único de procesos de fabricación y tratamiento final del ciclo evaluación económica del proyecto y evaluación del impacto ambiental (Ghasem, 2011).

Reactores

En la industria el modelado de los reactores es un paso difícil en la simulación del proceso, pero es fácil construir un modelo con resultados predecibles del rendimiento principal, se debe considerar que los modelos de la biblioteca no son demasiado sofisticado para acoger todos los detalles de todo el proceso, acoge una cierta información, se puede determinar la composición externa del reactor, velocidad de la desactivación catalítica y otros parámetros importantes (Fogler, 2008)

Reformado con vapor

En la actualidad el reformado con vapor de gas natural, que se compone principalmente de metano, el cual se utiliza para la obtención de hidrogeno. Involucra la reacción de hidrocarburos con vapor las reacciones 1 y 2 sobre catalizadores de Ni soportados a 500-950 °C. Las siguientes reacciones 3 de metanización y 4 como sigue (Natesakhawat, 2005):

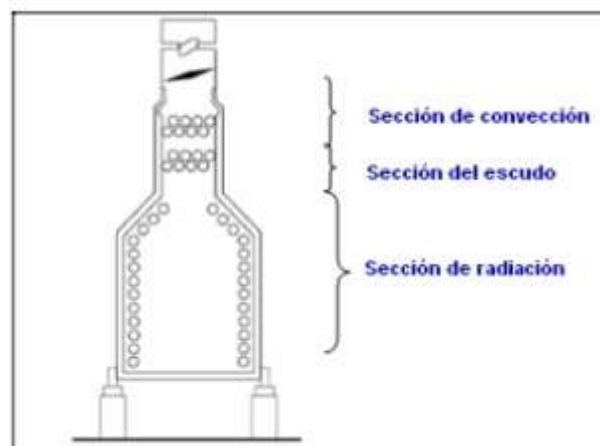


Horno

Es un recinto cerrado mediante el interior transfiere calor a todo tipo de cuerpo puede ser hasta sustancias, se los puede encontrar de distintas formas y modo de transferir calor a la sustancia o material que se quiera suministrar calor en la figura muestra las secciones de transferencia de calor para un horno (Sandoval, 2007).

Figura 1

Secciones del horno



Nota. Tomada de (*Diseño de guía para especificación de hornos de refinería y simulación por HTRI-Xfh*).

Química verde

La química verde en la actualidad es una tendencia que busca alternativas a productos o procesos que tengan buena compatibilidad con el ambiente, reemplazando la producción de sustancias peligrosas, para proteger la salud humana (Vargas & Pimiento, 2007).

Los 12 principios de la química verde

1. Prevención: Se prefiere no obtener el producto antes de tratar limpiar el producto formado
2. Economía atómica: El métodos de síntesis se deben diseñar para no generar subproductos durante el procesos
3. Uso de metodologías para la generación de productos con menor cantidad de toxicidad siempre que sea posible, se debe diseñar los métodos de síntesis para generar productos que tengan poca o ninguna toxicidad que sea beneficioso al ser humano y al medio ambiente.
4. Generar productos eficaces y no tóxicos: Los productos químicos se deben diseñar con tal que mantenga la eficiencia y a la vez reduzca su toxicidad.
5. Reducir el uso de sustancias auxiliares: Se evitará el uso de sustancias en los posible que no sea imprescindible y si es necesario que sea lo menos tóxico posible.
6. Disminuir el consumo energético: Se categoriza por el impacto ambiental y económico se deben reducir lo más que se pueda en los requerimientos energéticos y en lo posible utilizar el método de síntesis a temperatura y presión ambiente.
7. Utilización de materias primas renovables: Es preferible que la materia prima sea renovable en vez que sea agotado, se debe preferir que sea económicamente viable.

8. Evitar la derivatización innecesaria: En lo posible que los productos no se generen
9. Potenciación de la catálisis: Se reemplazará los reactivos estequiométricos por catalizadores reutilizables.
10. Generar productos biodegradables: Se diseñará productos químicos que no persistan en el medio ambiente sino en productos de degradación que no causen daño.
11. Desarrollar metodologías analíticas para la monitorización en tiempo real: Se desarrollará para monitorizar y controlar el tiempo donde se forman sustancias peligrosas.
12. Minimizar el potencial de accidentes químicos: se seleccionara las sustancias que se aplicará en el proceso químico con el fin de minimizar los riesgos de accidentes químicos, como también las emanaciones, explosiones e incendios.

CAPITULO III

METODOLOGÍA

Demanda de biomasa y policarbonato en el Ecuador

En el Ecuador existe una demanda de residuos que se importan en el año 2021, según las estadísticas se ha generado alrededor de 2 992,66 ton/año. La disponibilidad de biomasa de cacao es 2'014 727.89 ton/año, se usó 62.6 Kton/año para el polímero y la biomasa como alimentación en la simulación con una relación 1:1.

Descripción general del proceso

Materias primas

El policarbonato y la cáscara de cacao, son las principales materias primas que se utilizan en la obtención del gas de síntesis.

Pirólisis del policarbonato (PC)

Los productos de degradación del PC se muestran en la Tabla 1, el rendimiento de producto de pirólisis, que se utiliza para la formación de las reacciones que van a intervenir en el reactor.

Tabla 1

Rendimiento de producto de pirólisis de PC (% en peso sobre polímero)

Análisis de productos(% peso sobre polímero)	Rendimiento líquido	Rendimiento de gas	Rendimiento sólido
No catalítica	57.03	18.46	24.5
ASM-5	57.47	19.06	23.47
ZSM-5 eq/dil.	47.25	20.80	31.95
Silicalita	58.32	20.32	21.36
USY	40.8	22.82	36.39

Análisis de productos(% peso sobre polímero)	Rendimiento líquido	Rendimiento de gas	Rendimiento sólido
Al-MCM-41	48.75	20.29	30.96
γ -Al ₂ O ₃	38.49	22.07	39.45
MgO-HP	51.01	18.37	30.61
MgO-MP	52.32	17.75	29.93
CaO	49.7	12.49	37.8

Nota. Esta tabla muestra la descomposición del policarbonato en fracciones líquida, gaseosa y sólida. Tomada de (Catalytic and thermal pyrolysis of polycarbonate in a fixed-bed reactor: The effect of catalysts on products yields and composition).

En la Tabla 2 muestra las composiciones principales de los gases las cuales son CO₂, CO, H₂, CH₄ con respecto a cada catalizador.

Tabla 2

Composición de los principales gases (% en peso sobre PC)

Análisis de productos(% peso sobre polímero)	CO2	CO	H2	CH4
No catalítica	11.93	3.53	0.16	2.48
ASM-5	12.83	2.98	0.18	2.26
ZSM-5 eq/dil.	12.27	3.62	0.21	2.79
Silicato	13.24	3.4	0.19	2.70
USY	13.91	3.29	0.27	2.95
Al-MCM-41	13.15	2.72	0.19	2.48
γ -Al ₂ O ₃	13.56	3.83	0.4	3.02
MgO-HP	11.82	3.5	0.15	2.47

Análisis de productos(% peso sobre polímero)	CO₂	CO	H₂	CH₄
MgO-MP	11.92	2.79	0.22	2.39
CaO	4.79	3.96	0.36	2.93

Nota. Esta tabla muestra la descomposición de la fracción gaseosa. Tomada de Catalytic and thermal pyrolysis of polycarbonate in a fixed-bed reactor: The effect of catalysts on products yields and composition (p. 488). Por Antonakou et al., 2014, Elsevier.

En la Tabla 3 presenta la composición en fase líquida de la pirólisis del PC que se compone en aromático, HAP, Carbonilos, fenoles, otros y no identificados

Tabla 3

Composición de la fracción de pirólisis líquida de PC (% del área del cromatograma)

Análisis de productos(% peso sobre polímero)	Aromáticos	HPA	Carbonilos	Fenoles	Otros	No identificados
No catalítica	2.31	0.71	0.32	70.77	3.27	22.60
ASM-5	4.71	0.58		66.73	4.78	23.20
ZSM-5 eq/dil.	8.2	5.96		71.32	3.57	10.94
Silicato	3.11		0.24	78.46	4.15	14.05
USY	11.36	13.93		68.47	2.53	3.71
Al-MCM-41	8.12	3.16	0.29	73.97	6.82	7.64
γ -Al ₂ O ₃	12.54	2.45	0.27	78.77	3.08	2.88
MgO-HP	5.49		0.23	87.58	5.68	1.02
MgO-MP	5.41			88.36	1.47	4.76
CaO	6.55	0.52	0.56	81.8	5.07	5.64

Nota. Esta tabla muestra la descomposición de la fracción gaseosa. Tomada de (Catalytic and thermal pyrolysis of polycarbonate in a fixed-bed reactor: The effect of catalysts on products yields and composition).

Descomposición de la biomasa mediante la pirólisis térmica

La biomasa está formada por hemicelulosa, celulosa, lignina, la cual se va a descomponer mediante la pirólisis, se utiliza para plantear las reacciones que se utilizará en el reactor como muestra la Tabla 4.

Tabla 4

Descomposición de la hemicelulosa y celulosa

Temperatura, °C	350	400	450	450	Composición media del gas. %w
Tiempo del experimento	17	28	37	95	
Componentes,% w	Composición, %w				
CO ₂	54.9	52.8	50	42.2	51.5
CO	34.9	34.7	35.6	34.4	34.9
CH ₄	5	6.2	8.2	10.2	7.4
C ₂ H ₆	1.2	1.5	1.9	2.2	1.7
C ₂ H ₄	0.9	1	1.2	1.2	1.1
C ₃ H ₆	0.5	0.5	0.6	0.7	0.6

Nota. Esta tabla muestra la descomposición de la hemicelulosa y celulosa. Tomada de (*Pyrolysis of woody material*).

La Tabla 5 muestra la descomposición de la lignina con los productos, que se utilizara para formar la reacción de lignina.

Tabla 5*Descomposición de la lignina*

Componente	Wt%	g
H ₂	11.92	4.310
CO	36.88	13.32
CO ₂	33.17	11.98
CH ₄	15.99	5.78
C ₆ H ₆	-	45

Nota. Esta tabla muestra la descomposición de la lignina. Tomada (Pyrolysis of lignins: experimental and kinetics studies).

Composición de la cáscara de cacao

Quezada et al (2018), indica la cantidad de composición química de la cáscara de cacao como: 53.7% celulosa, 18.7% hemicelulosa, 25.7% lignina y 2% cenizas siendo la composición utilizada en la simulación ASPEN PLUS.

Procesos para la obtención del gas de síntesis**Sección del horno de pirólisis**

El horno tiene tres secciones el de convección, sección de escudo y sección de radiación, en el cual se lleva a cabo la pirólisis de la biomasa y del policarbonato, en este caso se utilizara un reactor de flujo pistón en el que se va a dar la sección de radiación del horno.

Sección del proceso de separación

Se utiliza un proceso de separación para separar las fase líquida y gaseosa, para que la fase gaseosa que están los productos de interés pasen a un proceso de reformado para ello se utiliza un separador flash.

Reformado de vapor

En este proceso se lo realiza con en el fin de descomponer la corriente liviana que se obtiene del separador como el CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_6 y los demás productos en gas de síntesis, para ello se utiliza un rector de equilibrio y un intercambiador de calor.

Descripción de las operaciones unitarias utilizadas en la simulación

Reactor PFR

En la Figura 2 muestra el reactor PFR que es el reactor de flujo pistón, este modelo va a considerar que el fluido se desplace como tapón, a medida que la alimentación reacciona y fluye axialmente por el reactor se van consumiendo y por ende la conversión aumentara, se utilizan reacciones en fase gaseosa (Fogler, 2008).

Figura 2

Reactor de flujo pistón



Nota. Tomado de (Elementos de ingeniería de las reacciones químicas).

Filtro

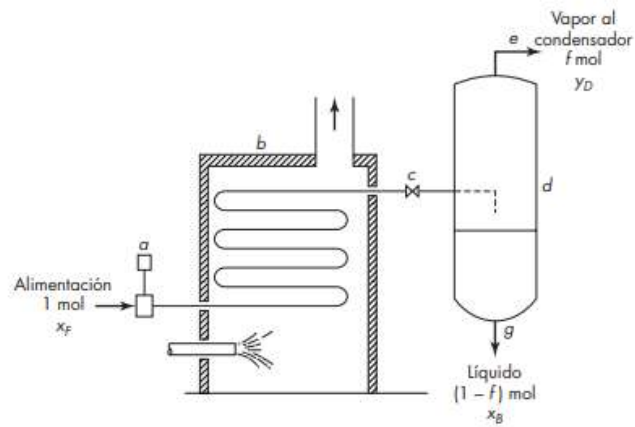
Consiste en separar partículas sólidas a partir de un fluido. Las filtraciones industriales van desde un proceso sencillo hasta separaciones de alta complejidad, se debe tener en cuenta que el fluido puede ser un gas o líquido (McCabe et al., 2007).

Destilación flash

Consiste en evaporizar una fracción líquida, de una manera que el vapor estará en equilibrio con líquido residual, la cual tiene como fin separar el vapor del líquido y condensado del vapor como se muestra en la Figura 3 (McCabe et al., 2007).

Figura 3

Planta de destilación flash



Nota. Tomado de (*Operaciones unitarias en ingeniería química*).

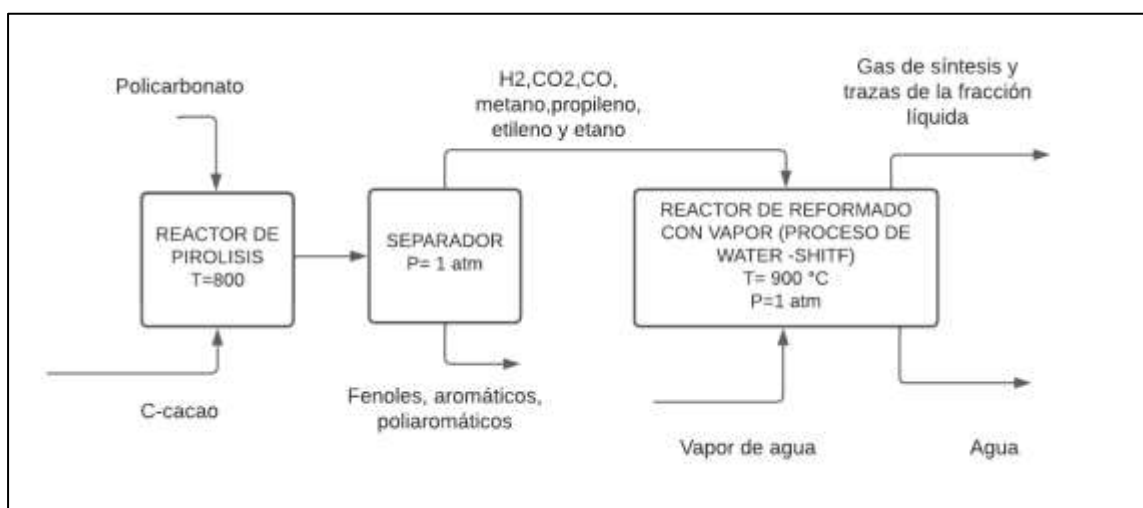
Diagrama de proceso

Diagrama de flujo

En la Figura 4 muestra el proceso simplificado y las operaciones principales para la obtención de gas de síntesis mediante un diagrama de bloques.

Figura 4

Diagrama de bloques del proceso para la obtención de gas de síntesis



Especificaciones de diseño del reactor

Sandoval (2007), indica que se debe considerar los valores recomendados por la norma API STD.560, para el diámetro externo de los tubos, cada valor del diámetro externo tiene un espesor de tubería y un diámetro nominal como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6

Dimensiones de los tubos

Dimensiones de los tubos		
Diámetro externo (in)	Diámetro nominal (in)	Espesor de pared (in)
2.375	2	0.135
2.875	2.5	0.178
3.5	3	0.189
4	3.5	0.198
4.5	4	0.207
5.563	5	0.226
6.625	6	0.245
8.625	8	0.282
10.75	10	0.319

Nota. Tomado de (Diseño de guía para especificación de hornos de refinería y simulación por HTRI-Xfh).

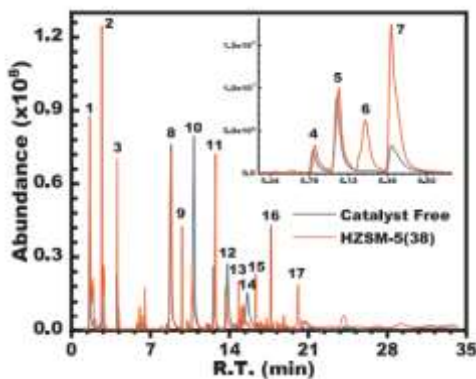
Reacciones presentes en el proceso de pirólisis del policarbonato

Para la obtención de las reacciones se basa en las fracciones líquida y gaseosa de la descomposición del policarbonato, siendo los componentes de la fracción líquida el naftaleno en el grupo de los poliaromáticos, benceno en el grupo de los aromáticos y fenol en el grupo de los fenoles siendo los más abundantes como muestra la Figura 5, cada pico del cromatograma indica 1. CO y CO₂, 2. Benceno, 3. Tolueno, 4. Etilbenceno, 5. P-xileno, 6. Polietileno, 7. Estireno, 8. Fenol, 9. Benzeno,1-propinilo, 10. Cresol,11. Naftaleno, 1-metil,

13. Naftaleno, 2-metil, 14. p-iso propenilfenol, 15. Bifenilo, 16. Bifenileno, 17. Fluoreno (Wang et al., 2020a).

Figura 5

Composición de las de la descomposición del policarbonato

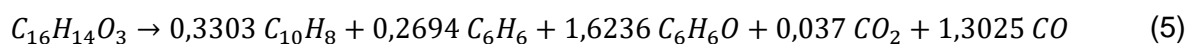


Nota. Tomado de (Converting polycarbonate and polystyrene plastic wastes into aromatic hydrocarbons via catalytic fast co-pyrolysis).

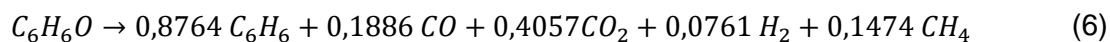
Reacción química del policarbonato

Para la generación de la reacción química del policarbonato se utilizó los componentes que tienen mayor valor al descomponerse el policarbonato tanto en fase líquida y gaseosa.

Fase 1: Obtención de productos líquidos



Fase 2: Obtención de productos gaseosos

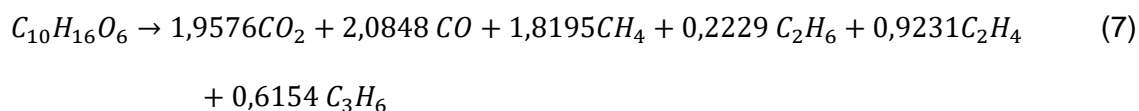


Reacciones presentes en el proceso de pirólisis de la biomasa

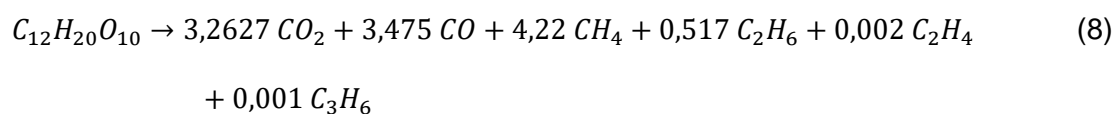
Para la generación de la reacción química de la biomasa se utilizó los componentes que tienen mayor valor al descomponerse, la biomasa está compuesta por lignina, celulosa,

hemicelulosa, la descomposición de los componentes de la biomasa son los siguientes reacciones.

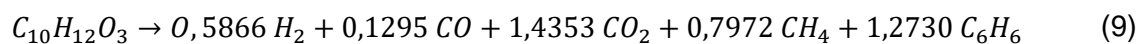
Hemicelulosa



Celulosa



Lignina



Parámetros cinéticos

Borrero-López et al (2018), indica que los parámetros de la celulosa, hemicelulosa y lignina se obtuvieron mediante la aplicación de Arrhenius como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7

Parámetros cinéticos de la biomasa

Componente	K [s⁻¹]	E [KJ/mol]
Celulosa	2690	87,54
Hemicelulosa	29300	85,48
Lignina	59,4	69,41

Nota. Tomado de (Modelling the reactions of cellulose, hemicellulose and lignin submitted to hydrothermal treatment).

Para el policarbonato los parámetros cinéticos se calcularon como se muestra en el Anexo 1, en la Tabla 8 se muestra la constante de velocidad y la energía de activación para las reacciones de descomponían del policarbonato.

Tabla 8

Parámetros cinéticos de la descomposición del policarbonato

Componente	K [s⁻¹]	E [KJ/mol]
Policarbonato	0,08763	29,245
Fenol	1,882e+06	166,189

Simulación

Se debe considerar los siguientes pasos para configurar simulaciones y analizar resultados, con el fin de llegar hacia una simulación completa, el cual se requiere seguir los siguientes pasos:

1. Construir PDF
2. Consultar las unidades de medida
3. Definir el componente
4. Selecciona el paquete termodinámico
5. Datos de corriente de suministro
6. Proporcionar condiciones de proceso
7. Ejecutar simulación y ver resultados

Ingreso de componentes no disponibles en el simulador

Mediante los pasos señalados se considera la opción 3, los simuladores contiene una librería con una base de componentes puros, pero no están todos los componentes disponibles, se opta tomar otra medida como dibujar la estructura para ello se selecciona el botón User-defined aparece una ventana, en el Component ID y Alias se escribe el título de la figura y dar clic en Next como se muestran en la Figura 6 y Figura 7.

Figura 6

Ventana de especificación de componente

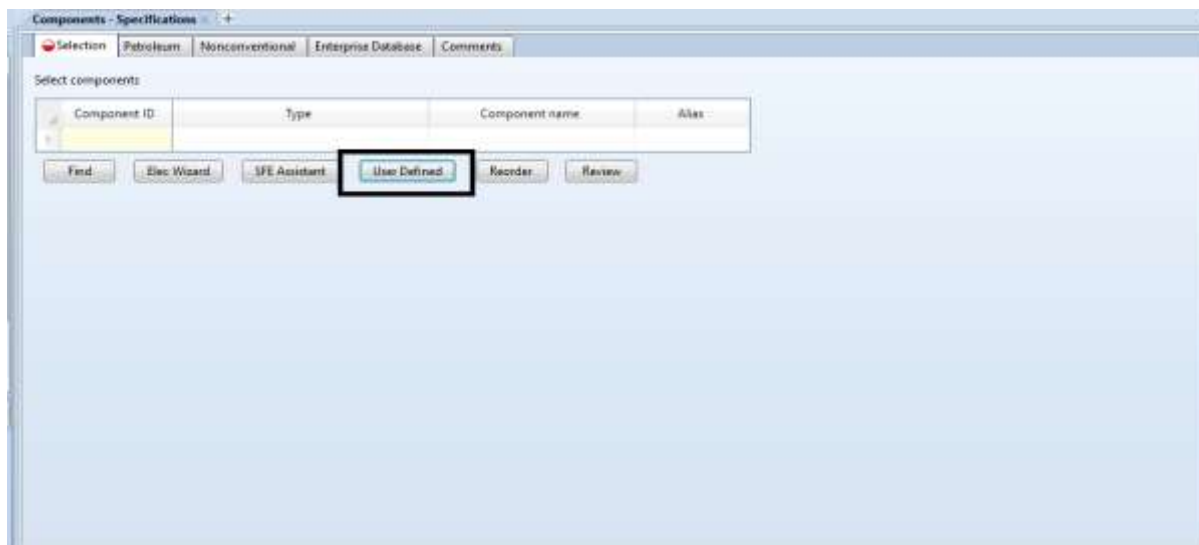
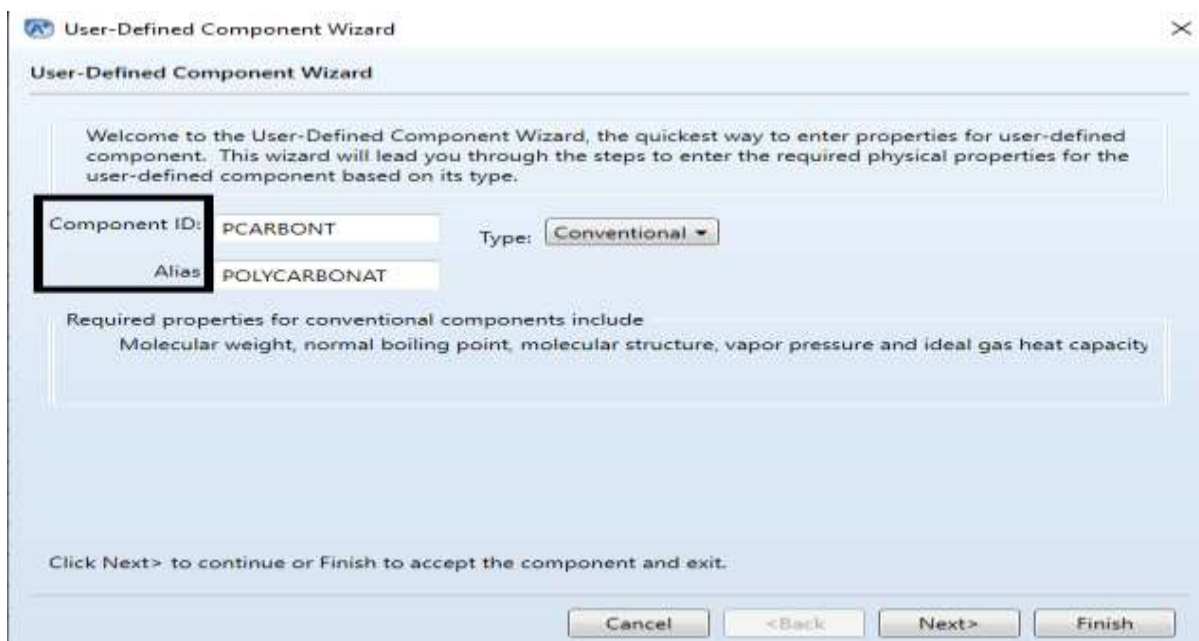


Figura 7

Ventana User-defined



Como en la librería no existe todos los componentes, se dibuja la estructura para ello seleccionamos la opción Draw/Impot/Edit structure , se procede a dibujar la estructura como se muestran en la Figura 8 y Figura 9.

Figura 8

Selección de Draw/Import/Edit structure

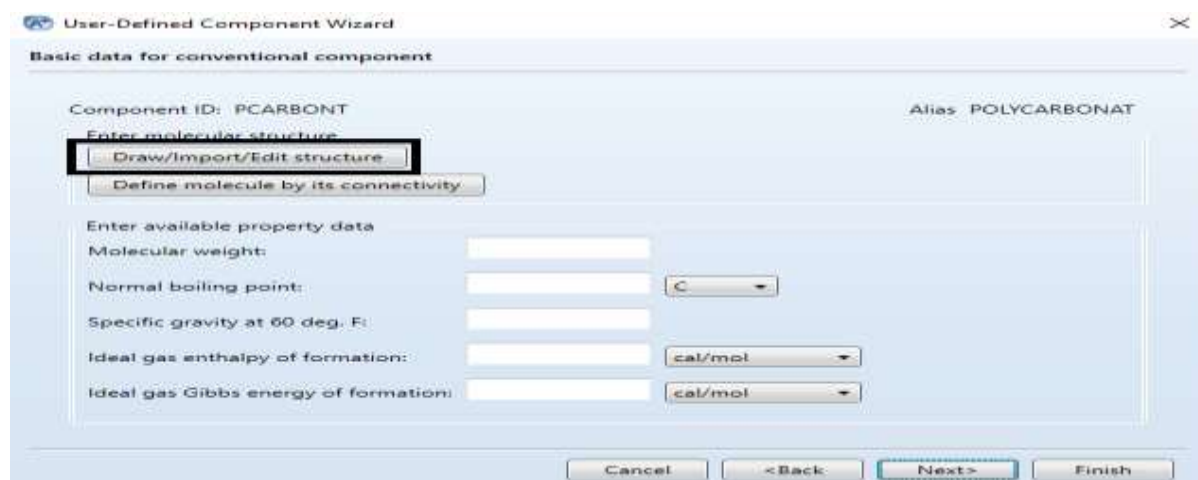
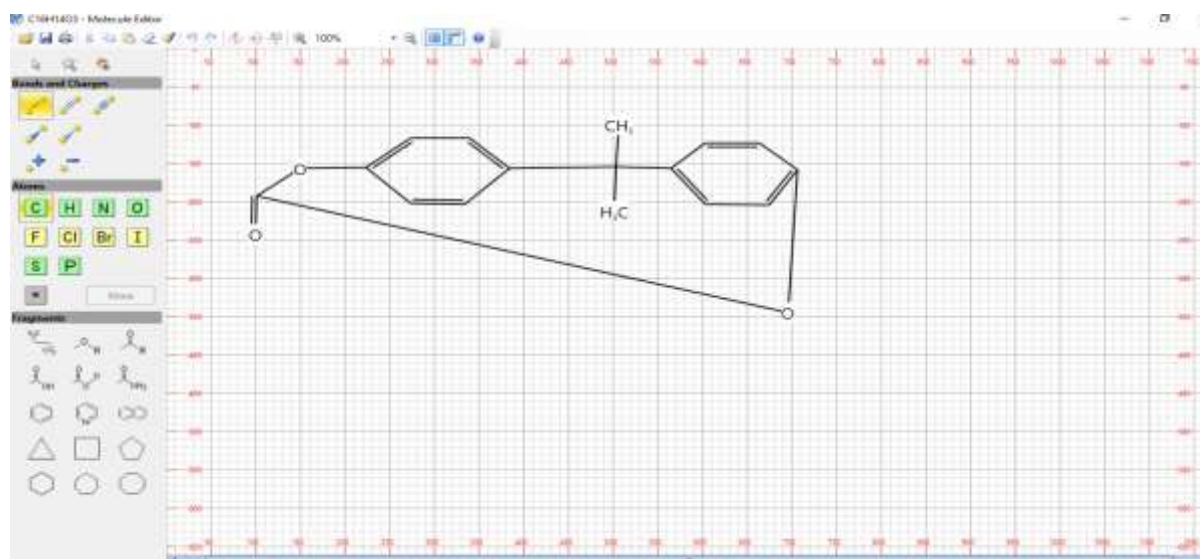


Figura 9

Ventana Molecule Editor



Una vez dibujada la molécula se verifica que diga Structure is available y seleccionamos Define molecule by its connectivity y después seleccionamos la opción structure y en calculate bonds como se muestran en la Figura 10 y Figura 11.

Figura 10

Verificar si la estructura está disponible

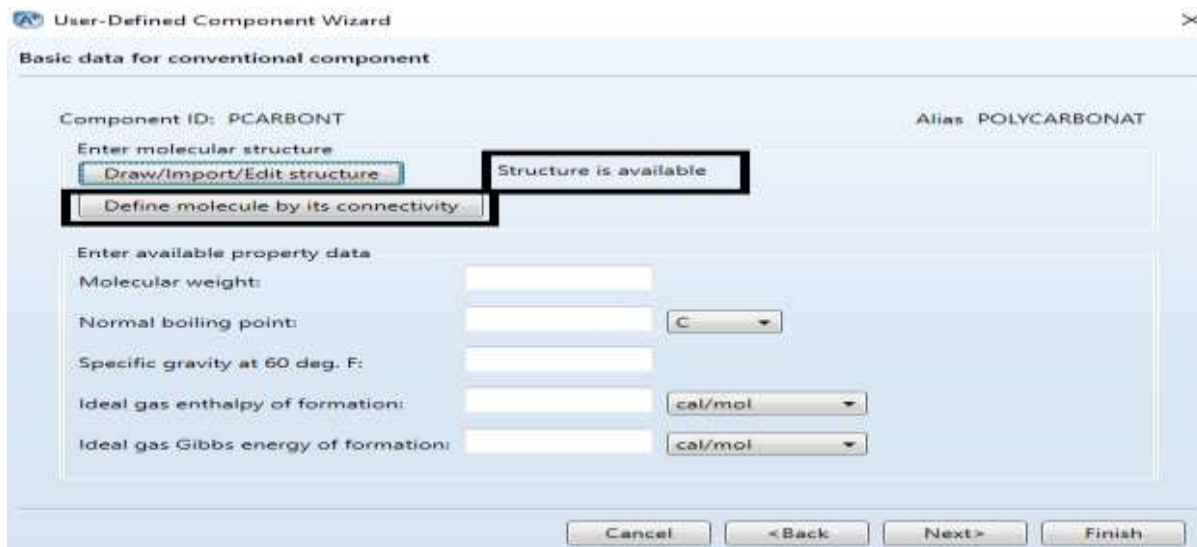
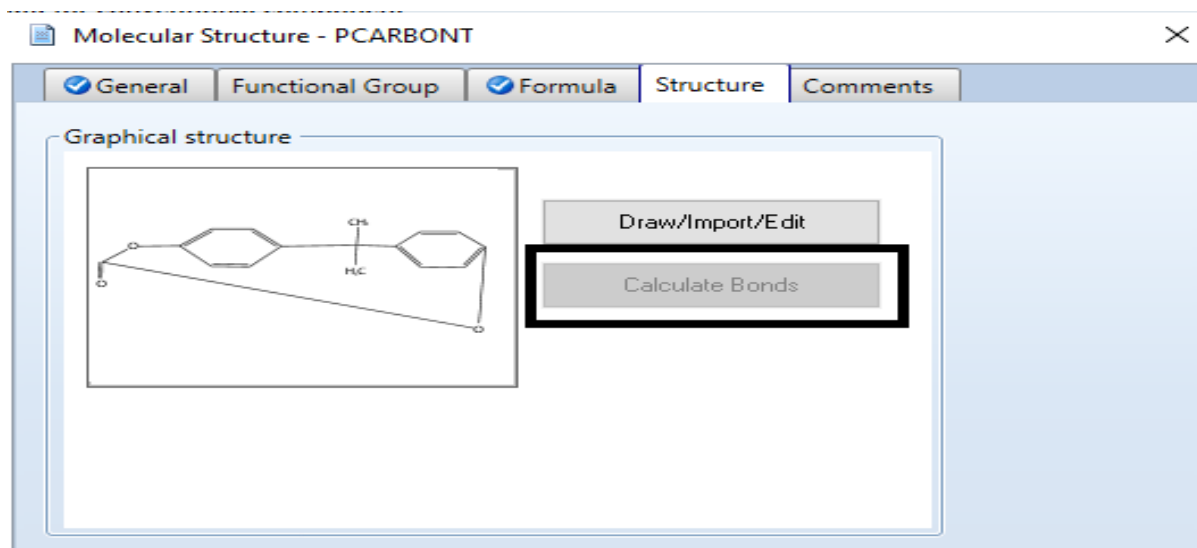


Figura 11

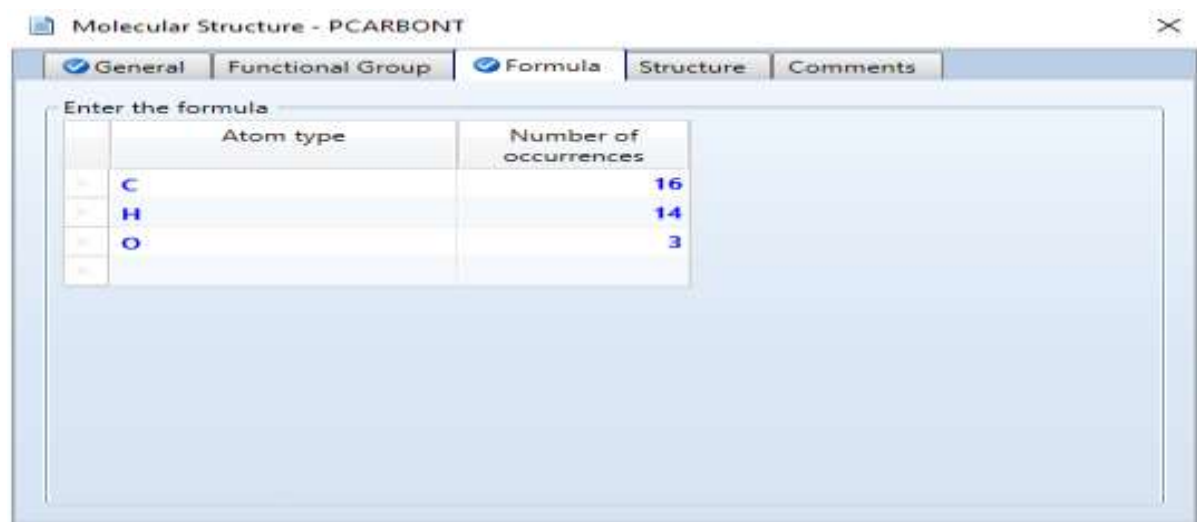
Ventana Molecule Structure



Seleccionamos en la opción Formula y vemos que cantidad de hidrógenos, carbono, y oxígeno tiene la estructura como se muestra en la Figura 12.

Figura 12

Formula del policarbonato



La ventana anterior cerramos y seleccionamos finalizar, para saber las propiedades del componente seleccionamos la opción NISIT y elegimos el componente, finalmente dar clic en Evaluate now como se muestra en la Figura 13.

Figura 13

Ventana NIST

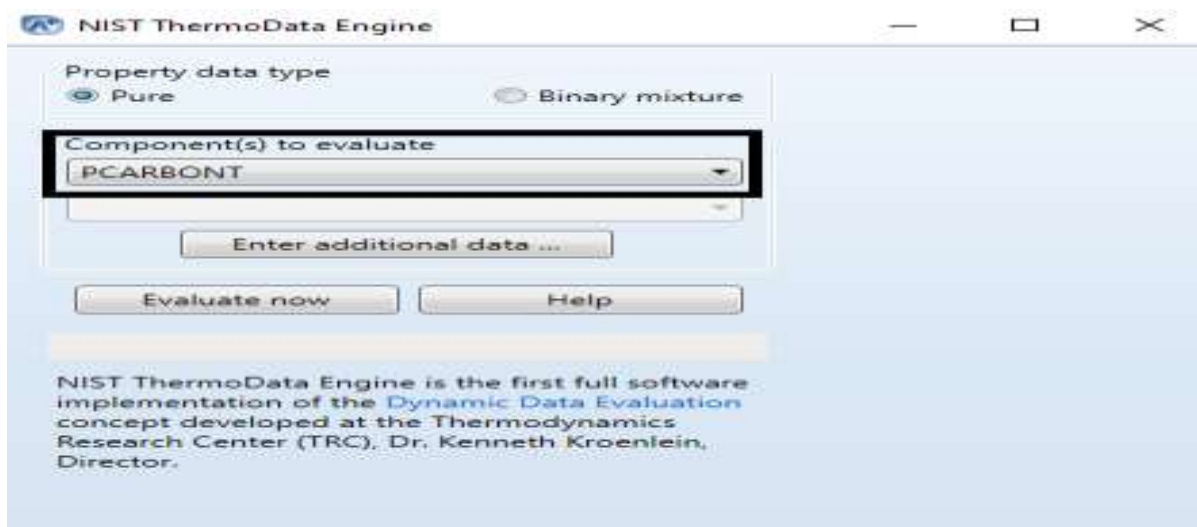


Figura 14

Propiedades del policarbonato

Properties for PCARBONT		Parameters			
	Name	Description	Value	Units	Uncertainty
Acentric Factor	OMEGA	Pitzer acentric factor		0,63498	0
Critical compressibility factor	ZC	Critical compressibility factor		0,228	0,222
Critical density (Liquid vs. Gas)	VC	Critical volume		0,7087 cm ³ /kmol	-0,0536
Critical pressure (Liquid vs. Gas)	PC	Critical pressure		2622929,6 N/sqm	2537994
Density (Liquid vs. Gas)	TC	Critical temperature		981 K	59,8
Enthalpy of vaporization or sublimation	DNLICOSTD	COSTALD parameters for liquid molar volume	+	kg/cm ³	
Heat capacity (Ideal gas)	DHVLITDEW	TDE Watson equation for heat of vaporization	+	J/kmol	
Heat capacity (Liquid vs. Gas)	CPALIEE	TDE Aly-Lee ideal gas Cp	+	J/kmol-K	
Molecular weight	CPLTDECS	TDE equation for liquid Cp	+	J/kmol-K	
Normal boiling point	MW	Molecular weight		254,28	0
Thermal conductivity (Gas)	TB	Normal boiling point		714,6 K	86
Thermal conductivity (Liquid vs. Gas)	KVTMLPO	ThermoML polynomials for vapor thermal conductivity	+	Watt/m-K	
Vapor pressure (Liquid vs. Gas)	KLTMLPO	ThermoML polynomials for liquid thermal conductivity	+	Watt/m-K	
Viscosity (Gas)	WAGNER25	TDE Wagner 25 liquid vapor pressure	+	N/sqm	
Viscosity (Liquid vs. Gas)	MUVTMLPO	ThermoML polynomials for vapor viscosity	+	N-sec/sqm	
	MULPPO59	PPD59 equation for liquid viscosity	+	N-sec/sqm	
	FAMILY	Compound family name		AROMATIC ESTERS	
	SUB FAMILY	Compound sub family name			

Se siguen los mismos pasos para la obtención de las propiedades de la lignina, celulosa y hemicelulosa.

Figura 15

Estructura hemicelulosa

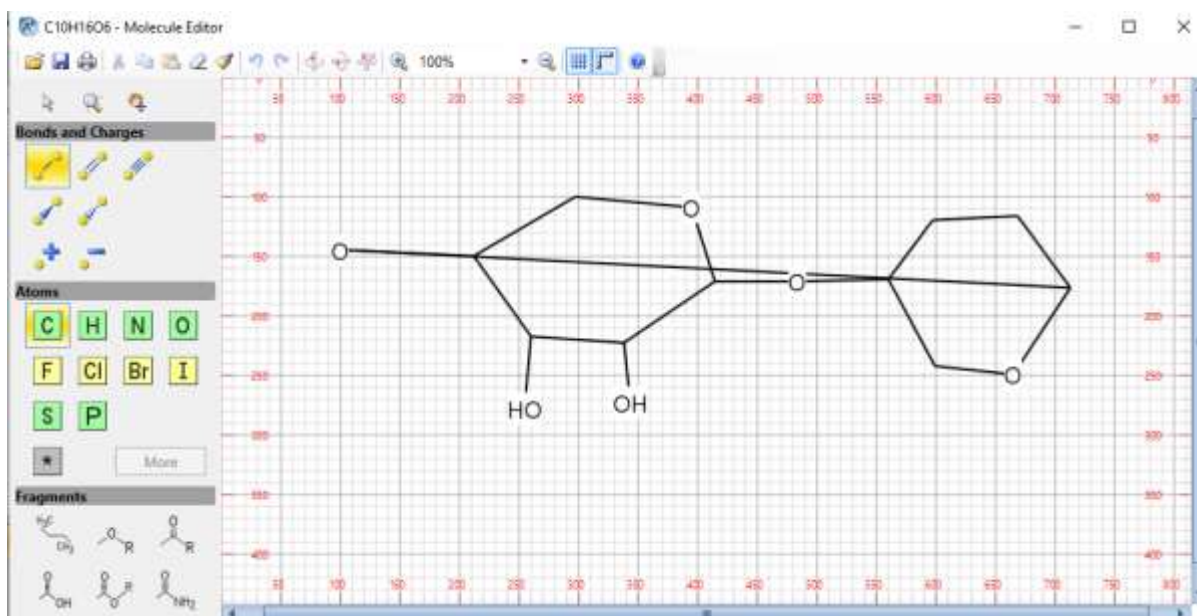


Figura 16

Propiedades de la hemicelulosa

Properties for HCELLULOS		Parameters			
Name	Description	Value	Units	Uncertainty	
OMEGA	Pitzer acentric factor	0,0682		0	
ZC	Critical compressibility factor	0,218		0,218	
VC	Critical volume	0,5485	cm ³ /mol	-0,0543	
PC	Critical pressure	2719568,4	N/sqm	2719568,4	
TC	Critical temperature	824	K	11,2	
DNLCOSTD	COSTD parameters for liquid molar volume	+	kg/cm		
DHVLDEW	TDE Watson equation for heat of vaporization	+	J/mol		
CPALIEE	TDE Aly-Lee ideal gas Cp	+	J/mol-K		
MW	Molecular weight	232,23		0	
TB	Normal boiling point	609,4	K	52,8	
DELTA	Solubility parameter @ 25 C	25620,1	(J/cm) ³	25620,1	
SG	Specific gravity	1,5308		0,0921	
VLSTD	API standard liquid molar volume	0,15186	cm ³ /mol	0,00913	
KVTMLPO	ThermoML polynomials for vapor thermal conductiv	+	Watt/m-K		
KLTMLPO	ThermoML polynomials for liquid thermal conductiv	+	Watt/m-K		
WAGNER25	TDE Wagner 25 liquid vapor pressure	+	N/sqm		
MUVTMLPO	ThermoML polynomials for vapor viscosity	+	N-sec/sqm		
FAMILY	Compound family name	OTHER POLYFUNCTIONAL C			
SUB FAMILY	Compound sub family name	alcohol-ether			

Figura 17

Estructura simplificada de la celulosa

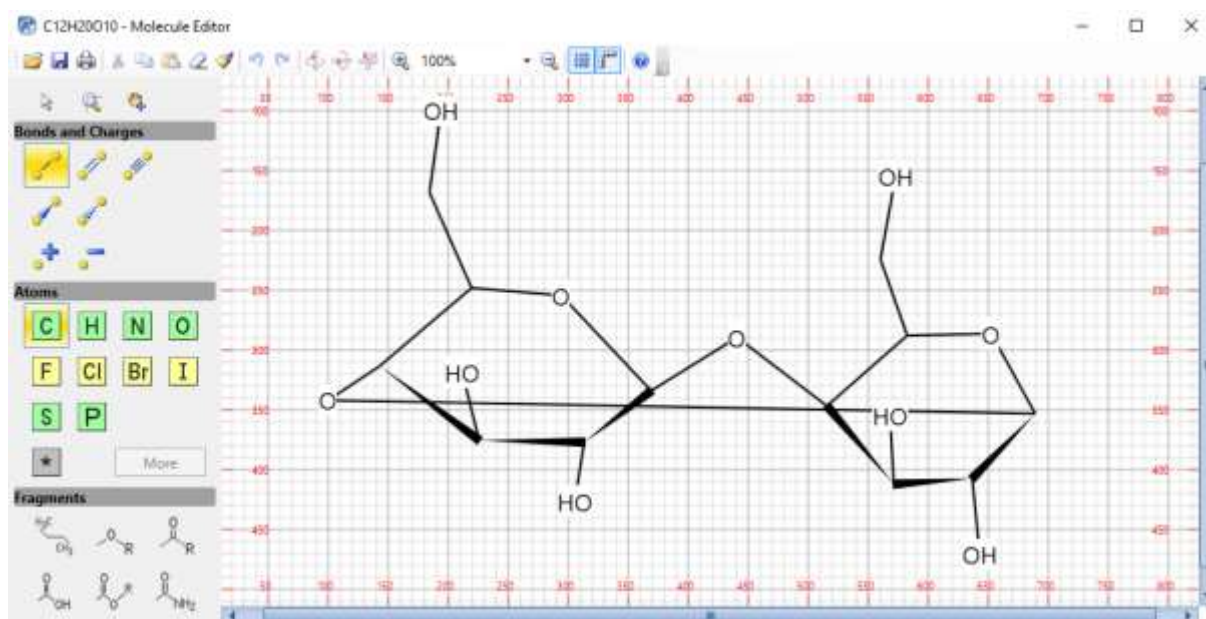


Figura 18

Propiedades de la celulosa

Properties for CELULOSA		Parameters				
All		Name	Description	Value	Units	Uncertainty
Acentric Factor		OMEGA	Pitzer acentric factor		1,9163	0
Critical pressure (Liquid vs. Gas)		PC	Critical pressure		4056959,7 N/sqm	4056959,7
Critical temperature (Liquid vs. Gas)		TC	Critical temperature		961 K	53,5
Heat capacity (Ideal gas)		CP1ALEE	TDE Aly-Lee ideal gas Cp	+	J/kmol-K	
Molecular weight		MW	Molecular weight		324,28	0
Normal boiling point		TB	Normal boiling point		770 K	63,1
Thermal conductivity (Liquid vs. Gas)		KLTMLPO	ThermoML polynomials for liquid thermal conductivit +		Watt/m-K	
Vapor pressure (Liquid vs. Gas)		WAGNER25	TDE Wagner 25 liquid vapor pressure	+	N/sqm	
		FAMILY	Compound family name		OTHER POLYFUNCTIONAL C	
		SUB FAMILY	Compound sub family name		alcohol-ether	

Figura 19

Estructura simplificada de la lignina

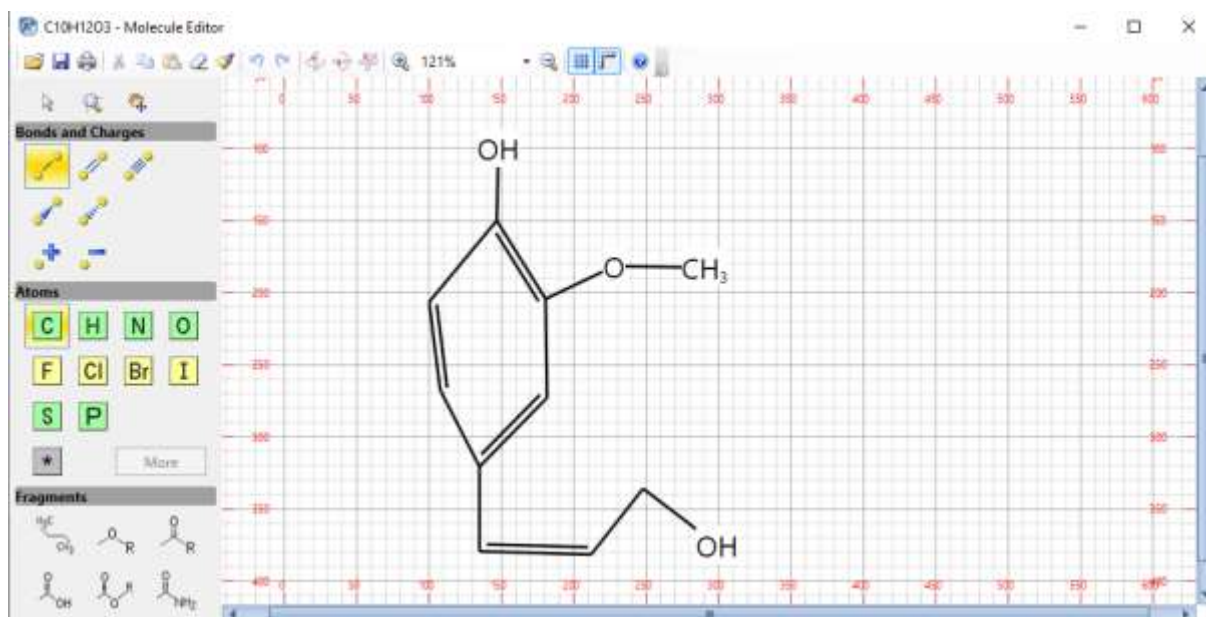


Figura 20

Propiedades de la lignina

Name	Description	Value	Units	Uncertainty
OMEGA	Pitzer acentric factor	1,0676		0
ZC	Critical compressibility factor	0,235		0,235
VC	Critical volume	0,5144	cm ³ /kmol	-0,0279
PC	Critical pressure	3140122,4	N/sqm	3140122,4
TC	Critical temperature	828	K	33,5
DNLCOSTD	COSTALD parameters for liquid molar volume	+	kg/cm ³	
DHVLDEW	TDE Watson equation for heat of vaporization	+	J/kmol	
CPALIEE	TDE Aly-Lee ideal gas Cp	+	J/kmol-K	
MW	Molecular weight	180,2		0
TB	Normal boiling point	606,7	K	85
DELTA	Solubility parameter @ 25 C	29855	(J/cm ³) ^{0,5}	29855
SG	Specific gravity	1,301		0,175
VLSTD	API standard liquid molar volume	0,1386	cm ³ /kmol	0,0186
KVTMLPO	ThermoML polynomials for vapor thermal conductivit	+	Watt/m-K	
KLMLPO	ThermoML polynomials for liquid thermal conductivit	+	Watt/m-K	
WAGNER25	TDE Wagner 25 liquid vapor pressure	+	N/sqm	
MUVTMLPO	ThermoML polynomials for vapor viscosity	+	N-sec/sqm	
FAMILY	Compound family name	OTHER POLYFUNCTIONAL C		
SUB FAMILY	Compound sub family name	alcohol-ether		

Selección del modelo termodinámico

El modelo termodinámico utilizado en el simulador es NRTL como el método base siendo un modelo de coeficiente de actividad se aplica en mezclas de líquidos de hidrocarburos y en mezclas polares y no polares se eligió por tener presiones menor a 10 bar siendo un polar y trabajar en sistema líquido gas, para la elección del paquete termodinámico se basó en los productos que se va a obtener en cada proceso.

Proceso de pirólisis

Seider et al (2009), según la heurística 25 indica que a temperaturas mayores a 750 ° F se debe utilizar un horno, para la obtención del gas de síntesis se utiliza temperaturas altas mayores a 500 °C. La degradación no catalítica del policarbonato se realizó en micropirólizador conectado a una cromatografía de gases/espectrometría de gases a una temperatura de 700 °C, donde se produce una serie de compuestos aromáticos que incluyen hidrocarburos aromáticos como benceno, naftaleno y tolueno y productos fenólicos como fenol y el cresol (Wang et al., 2020b).

Lestinsky & Palit (2016), menciona la descomposición de la biomasa a diferentes temperaturas en un rango de 300 a 800 °C, obteniendo más cantidad de gas de síntesis a mayor temperatura aumentando el valor de CO y H₂.

Según (Antonakou et al., 2014) indica que para el experimento se utilizó el policarbonato el cual, se usó un molino para moler las partículas de PC a un tamaño de menos de 2mm que se utilizó para los experimentos de pirolisis.

La descomposición térmica del policarbonato y de la biomasa se dan en un reactor de flujo pistón, el reactivo limitante es el polímero el cual se degrada lentamente. Para obtener una conversión del 95% se deberá variar el número de tubos, se introducen las reacciones químicas y los parámetros cinéticos, la alimentación es precalentada a 800 °C en un heater para el ingreso al reactor en el que se genera la descomposición del polímero y la biomasa, los productos ingresan a un filtro para eliminar productos sólidos como se muestra en la Figura 21.

Figura 21

Simulador del reactor

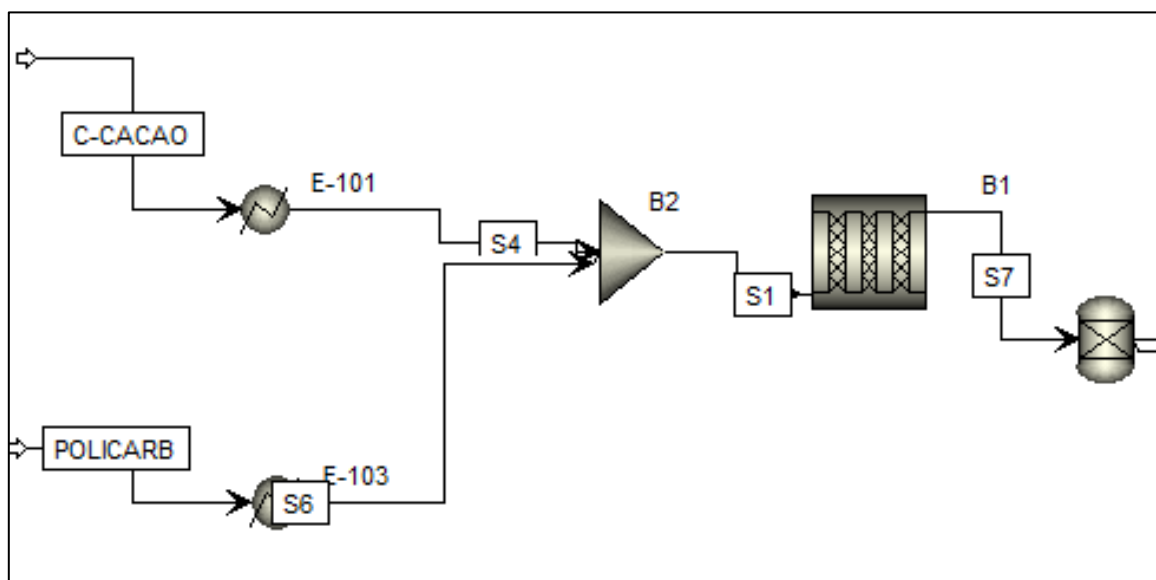


Tabla 9*Datos de la corriente de alimentación al reactor PFR*

Corriente	Flujo másico (Kton/año)	Presión (atm)	Temperatura (°C)
Policarbonato	62,6	1	25
c-cacao	62,6	1	25

Equipo	Número de tubos	Presión (atm)	Temperatura (°C)
Reactor Plug	5532	1	800
Heater		1	800

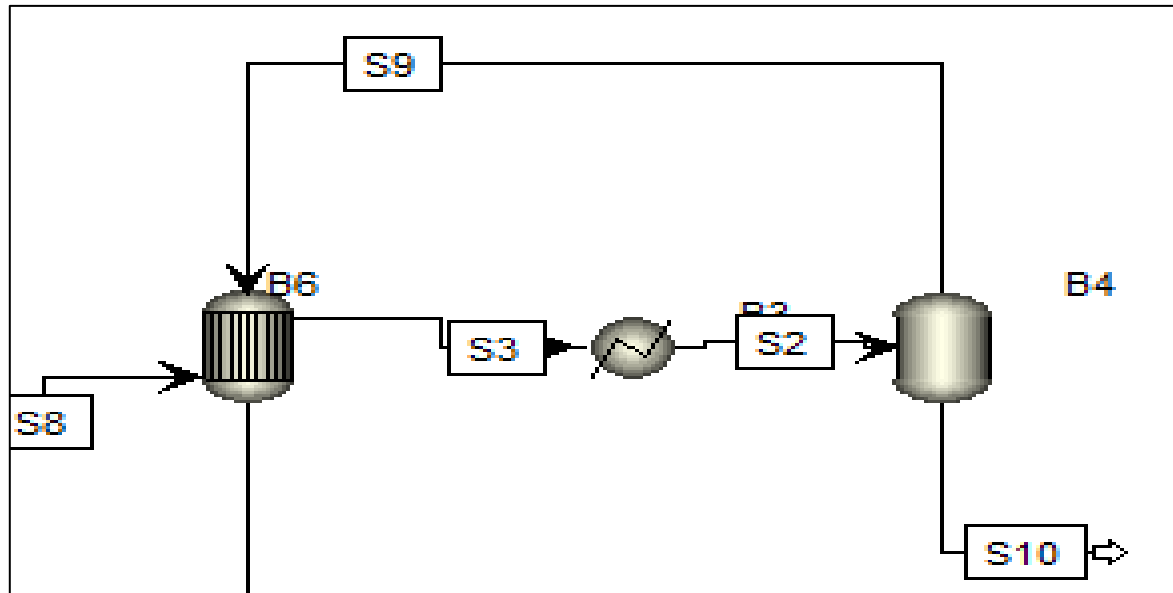
Separación de la fase líquida y gaseosa

La corriente que sale del filtro ingresa a un intercambiador de calor según Seider et al (2009), menciona que la heurística 26 indica que la temperatura mínima de aproximación es de 20 ° F por encima de la temperatura ambiente hasta 300 °F y para temperaturas menores a 20 °F se necesita tener una variación de temperatura de 10 °F.

Se utiliza una temperatura de 20 °F para el intercambiador de calor con el fin de aprovechar al máximo el potencial de calor y no haya cruce de temperatura, la corriente que sale ingresa a un heater el cual utiliza propano como refrigerante según Seider et al (2009) indica que el rango de operación típico es de -40 a 20°F. En el destilador Flash se separa la fracción líquida de la gaseosa siendo los componentes pesados como naftaleno, benceno y trazas de fenol y de la fase gaseosa el gas de síntesis y trazas de la fase líquida como se muestra en la Figura 22.

Figura 22

Separación de la fase líquida del gas



Proceso de reformado catalítico

Según Natesakhawat (2005), indica que el proceso de reformado con vapor implica reacciones de hidrocarburos con vapor a una temperatura de 500-950 °C, las reacciones están acompañadas por la reacción del cambio agua- gas.

Se utiliza el reactor de equilibrio para las reacciones que se introduzcan alcancen el equilibrio a una determinada condiciones y por no disponer los datos cinéticos específicamente para las olefinas que se generan como son el propileno y el etileno, siendo uno de los productos gaseosos que pasan al reformado mediante revisión bibliográfica solo se encontró del metano y del etano, la cual se introdujeron dos reacciones para cada hidrocarburo como el propileno, etileno, metano y etano formando 9 reacciones , se utiliza un intercambiador de calor para la corriente de agua, con el fin de aprovechar el calor de la corriente gaseosa que sale del reactor a una temperatura de 20° F según la heurística 26 , la salida de este gas enfriado mediante heater utilizando propano como refrigerante y

considerando el rango de operación para el equipo, ingresa a un separador para separar el gas de la corriente líquida como se muestra en Figura 23.

Reacciones del reformado



Figura 23

Reactor de equilibrio

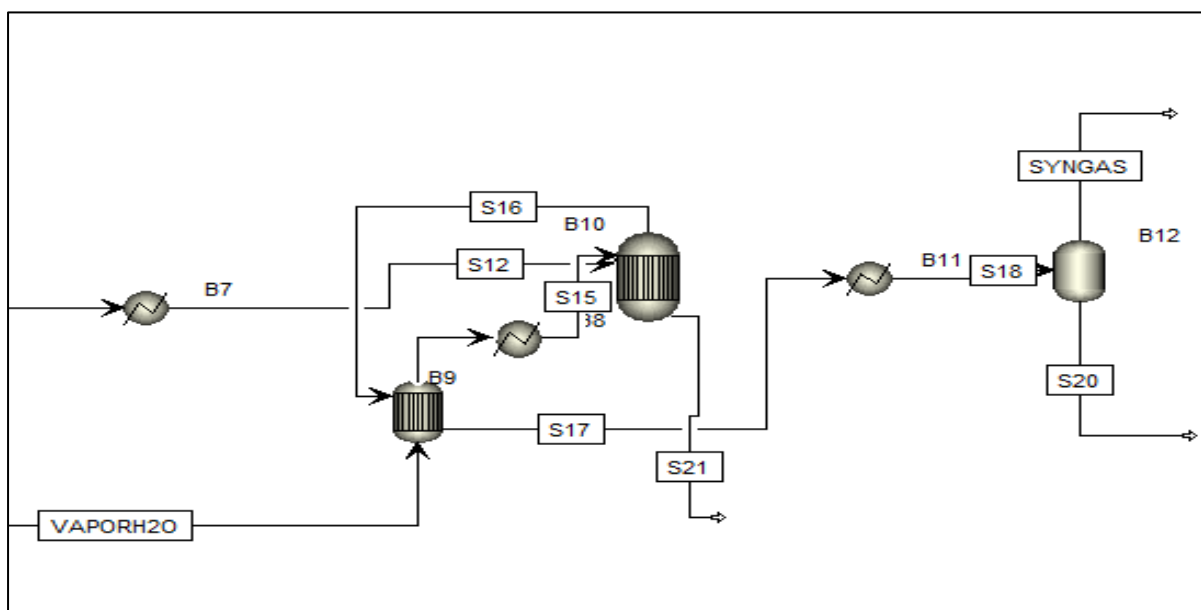


Tabla 10*Datos de entrada de cada equipo*

Componente	Flujo másico	Temperatura	Presión
Agua	222,8 Kmol/h	25°C	1

Equipo	Temperatura	Presión (atm)
Heater	900 °C	1
Reactor de equilibrio	900 °C	1
Intercambiador de calor	20 ° F	1
Heater	-30 °F	1

CAPÍTULO IV

Resultados y discusiones

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la simulación para la generación del gas de síntesis, mediante el software.

Alimentación del proceso

En la Tabla 11 muestra los flujos máxicos que se utilizó en la alimentación del proceso tanto del policarbonato y de la cáscara de cacao.

Tabla 11

Flujos máxicos de la alimentación

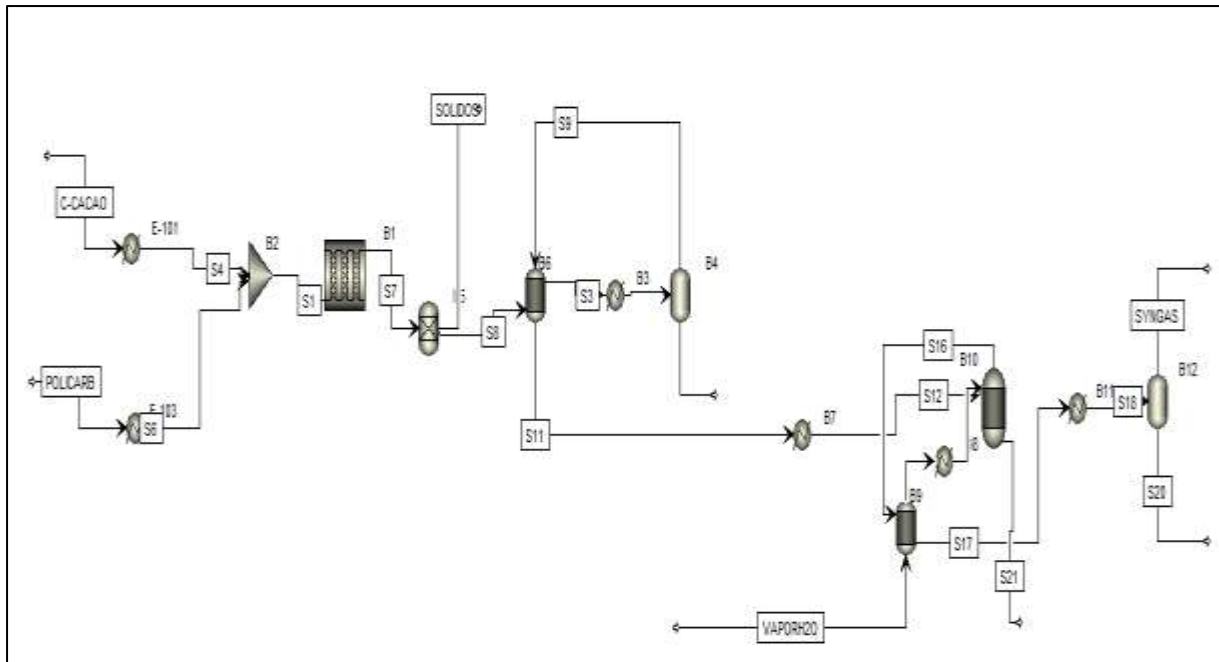
Datos iniciales	Flujo máxico [Kton/año]
Policarbonato	62.2
C-cacao	62.2

Obtención del gas de síntesis

Mediante una revisión bibliográfica, se determinó un modelado hipotético para la biomasa y el policarbonato. La Figura 24 muestra el proceso de la obtención de gas de síntesis diseñada en ASPEN PLUS V10. Como se observa en forma general en tres procesos. (1) Proceso de pirólisis se da en un reactor tubular de flujo pistón para la descomposición de la materia prima. (2) Proceso de separación consiste en separar la fracción gaseosa de la líquida. (3) Proceso de reformado con vapor, en el cual transforma la corriente de productos gaseosos en presencia con vapor de agua a gas de síntesis.

Figura 24

Proceso de la obtención de gas de síntesis diseñada



Balance de masa del proceso

En la tabla 12 muestra las corrientes del proceso simulado, donde se observa los flujos de cada componente tanto de entrada y de salida de cada componente en cada equipo.

Tabla 12

Balance de masa

Corriente	Flujo másico [kg/h]					
	S1	S2	S3	S4	S6	S7
PCARBONT	7141.22				7141.22	357.36
CO		2752.45	2752.45			2752.4
						5
Corriente	Flujo másico [kg/h]					

COMPONENTE	S1	S2	S3	S4	S6	S7
BENZENO		4516.19	4516.19			4516.19
H2		18.82	18.82			18.82
HCELULOS	1361.11			1361.11		
CELULOSA	3909.10			3909.10		
METANO		1221.09	1221.09			1221.09
CO2		3698.09	3698.09			3698.09
ETANO		226.75	226.75			226.75
ETENO		152.44	152.44			152.44
PROPILENO		152.194	152.19			152.19
H2O						
NAFTALENO		1129.43	1129.43			1129.43

Corriente	Flujo másico					
	[kg/h]					
COMPONEN TE	S8	S9	S10	S11	S12	S14
CO	2752.45	2751.00	1.44	2751.00 6	2751.00 6	
FENOL	59.02	0.0013	59.021	0.001	0.001	
BENZENO	4516.19	70.72	4445.4 6	70.72	70.72	
H2	18.82	18.82	0.0003	18.82	18.82	
HCELULOS CELULOSA LIGNINA						
METANO	1221.09	1219.02	2.073	1219.02	1219.02	
CO2	3698.09	3624.67	73.41	3624.67	3624.67	
ETANO	226.75	220.85	5.89	220.85	220.85	
ETENO	152.44	150.25	2.18	150.25	150.25	
PROPILENO	152.19	140.41	11.77	140.41	140.41	
H2O						4013.80
NAFTALENO	1129.43	0.01	1129.4 2	0.01	0.01	

Corriente	Flujo másico [kg/h]					
	Componente	S15	S16	S17	S18	S20
PCARBONT						
CO		6188.33	6188.33	6188.33		2.754
FENOL		0.001	0.0013	0.001		0.001
BENZENO		70.72	70.72	70.72		3.08
H2		612.58	612.58	612.58		0.009
HCELULOS						
CELULOSA						
LIGNINA						
METANO		1.089	1.089	1.08		0.001
CO2		3123.60	3123.60	3123.60		52.72
ETANO		3.06E-07	3.06E-07	3.06E-07		6.79E-09
ETENO		3.17E-06	3.17E-06	3.17E-06		3.86E-08
PROPILENO		1.48E-11	1.48E-11	1.48E-11		
H2O	4013.80	2213.26	2213.26	2213.26		2209.60
NAFTALENO		0.0109	0.0109	0.0109		0.010

Corriente	Flujo másico [kg/h]		
	SOLIDOS	SYNGAS	VAPOR H2O
PCARBONT	357.36		
CO		6185.58283	
FENOL		2.37E-07	
BENZENO		67.633791	
H2		612.57	
HCELULOS			
CELULOSA			
LIGNINA			
METANO		1.087	
CO2		3.07E+03	
ETANO		3.00E-07	
ETENO		3.13E-06	
PROPILENO			
H2O		3.66	4013.80
NAFTALENO		1.23E-07	

Especificación de diseño en el reactor

La especificación de diseño en el reactor de pirólisis se realizó con el fin de determinar el número de tubos para una conversión del 95% del policarbonato con el que se obtuvo un número de tubos de 5532, al inicio de la simulación se tomó un número aleatorio del número de tubos de 3000 y se observó que no se convertía en su totalidad el policarbonato. En la Tabla 13 se muestra el valor estimado vs valor determinado de la cantidad de tubos.

Tabla 13

Número de tubos obtenido en la especificación de diseño

Equipo	Número de tubos iniciales	Número de tubos determinados con el 95% de conversión
B1 (RPlug)	3000	5532

Análisis de sensibilidad

Se realizó el análisis de sensibilidad en el bloque B 1, para determinar la temperatura óptima para obtener mayor conversión del policarbonato siendo el compuesto que se descompone lentamente y obtener mayor rendimiento de gas generado como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14

Análisis de sensibilidad del reactor de pirólisis

Temperatura	Conversión del policarbonato	Rendimiento de gas generado
500	85.385486	48.2021965
515.789474	86.659288	48.5648613
531.578947	87.892539	48.8697726
547.368421	89.0664737	49.1967108
563.157895	90.1692288	49.559483
578.947368	91.1736084	50.0059411
594.736842	92.0944096	50.546626
610.526316	92.9205533	51.2037243
626.315789	93.6569256	52.0393473
642.105263	94.3124826	52.9964877

Temperatura	Conversión del policarbonato	Rendimiento de gas generado
657.894737	94.8867423	54.0123724
673.684211	95.0592014	54.9018805
689.473684	95.0311135	55.6309456
705.263158	95.0187589	56.2296457
721.052632	94.9927871	56.6877039
736.842105	94.9781779	56.9632658
752.631579	94.9589734	57.1432696
768.421053	94.955663	57.2525206
784.210526	95.0207476	57.3567199
800	95.0080074	57.3855391

Figura 25

Curva de conversión del policarbonato

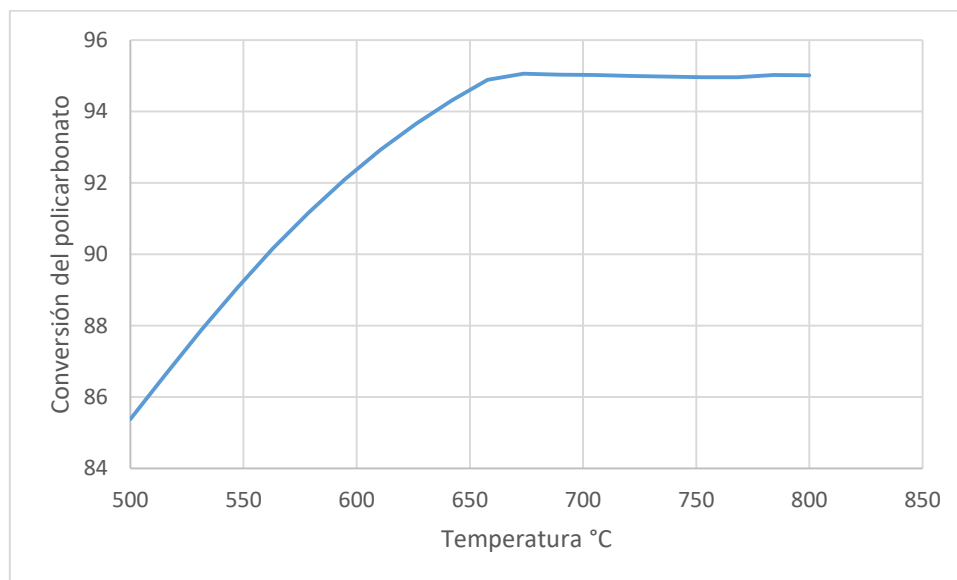
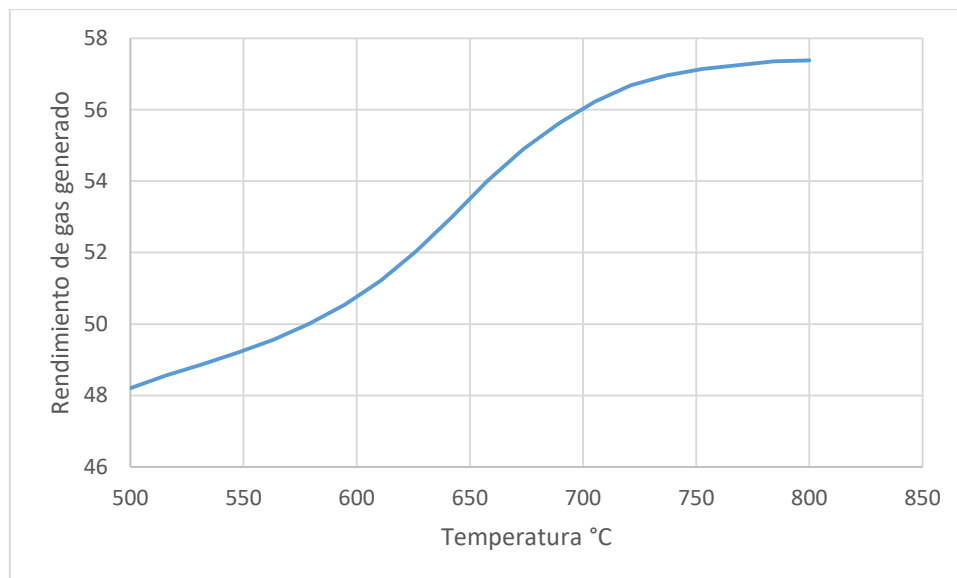


Figura 26*Curva del rendimiento de gas generado*

Al realizar el análisis de sensibilidad se obtuvo la temperatura óptima en el reactor, se observa a temperatura de 780 °C se tiene una conversión del 95% esto quiere decir que el policarbonato a esa temperatura ya se transformó casi en su totalidad y a una temperatura de 790 °C se tiene un rendimiento de 57.6 de gas generado.

Se realizó el análisis de sensibilidad en el bloque B 10, para determinar la temperatura óptima para obtener mayor conversión del metano y mayor rendimiento del hidrogeno como se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15*Análisis de sensibilidad del metano y rendimiento del hidrogeno*

Temperatura [°C]	Conversión %	Rendimiento de gas generado
820	99.4592091	7.26698533
840	99.6629681	7.30503547
860	99.786725	7.34478894
880	99.8629814	7.38627322
900	99.9106646	7.42947641
920	99.9409185	7.47431782
940	99.9603887	7.52059737
960	99.9730923	7.56790757
980	99.9814913	7.61547921
1000	99.9871152	7.66190999

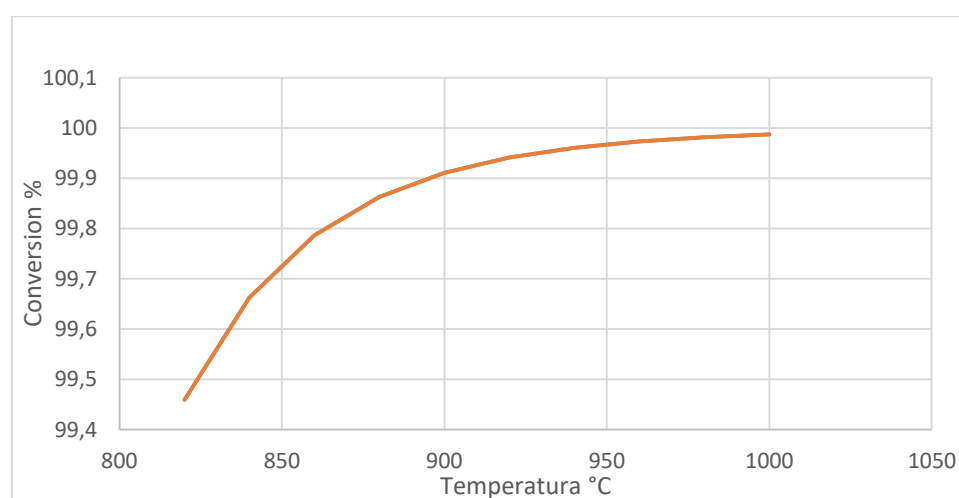
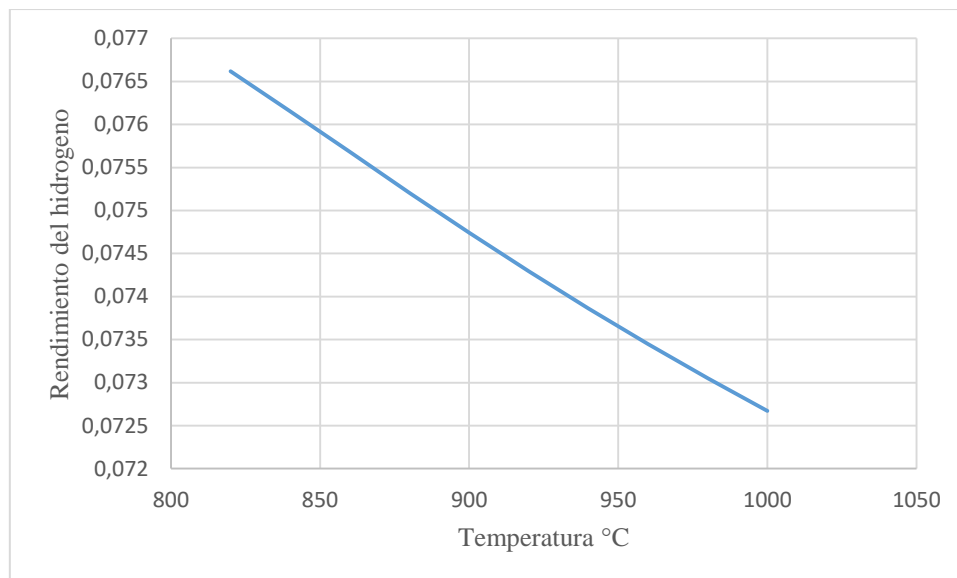
Figura 27*Curva de la conversión del metano*

Figura 28*Curva del rendimiento de hidrogeno*

Al realizar el análisis de sensibilidad del reactor de equilibrio del bloque B9 se observa que para una conversión del metano del 99,999 % a una temperatura de 980°C, siendo la temperatura óptima para la descomposición y a una temperatura de 1000 °C se obtiene un mayor rendimiento de hidrogeno.

Comparación de biomasas en la generación de gas de síntesis

En la Tabla 16 muestra que no hay mucha diferencia entre las biomasas la cual se puede observar que la diferencia es de 10 [kg/h] entre la cáscara de cacao y palma áfrica para la obtención de gas de síntesis.

Tabla 16*Comparación de las biomosas*

Corriente	Fracción molar	
	C-cacao	Palma africana
PCARBONT		
CO	0.37	0.37
FENOL	4.224E-12	4.289E-12
BENZENO	0.0015	0.0014
H2	0.51	0.51
HCELULOS		
CELULOSA		
LIGNINA		
METANO	0.00011	0.00012
CO2	0.12	0.11
ETANO	1.67E-11	2.0001E-11
ETENO	1.87E-10	2.206E-10
PROPANO		
H2O	0.000341	0.000342
NAFTALENO	1.605E-12	1.61E-12

CAPITULO V

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Con base a los resultados obtenidos a la salida del reactor de pirólisis en la simulación, se determinó el número de tubos en el reactor ideal para una conversión del 95% descomponiéndose el policarbonato y biomasa en el proceso de pirólisis, lo que quiere decir es que se tiene productos de valor agregado.

Se empleó un modelo simplificado para obtener reacciones simplificadas que intervienen en la descomposición del policarbonato y biomasa con el propósito de obtener gas de síntesis.

La temperatura tiene efectos determinantes en el proceso de la obtención de gas de síntesis, a mayor temperatura la conversión del metano y el rendimiento de gas generado, hidrogeno son altas en comparación con una temperatura baja.

Se realizó la simulación del diseño para la obtención de gas de síntesis a través de la utilización del policarbonato con las composiciones de la cáscara de cacao como materia prima en el que se obtuvo las composiciones molares a la salida de la corriente del proceso las cuales fueron de 0.37 CO, 0.51 H₂, 0.117 CO₂.

Por otro lado, se usó la cáscara de cacao como materia prima como fuente de biomasa para el proceso, debido a que es un producto comercial de importancia en el Ecuador y que genera alto contenido de residuos que deben ser aprovechados para generar otros productos de valor agregado.

Para el proceso de obtención de gas de síntesis, se estableció un diagrama de bloques con las condiciones establecidas mediante la revisión bibliográfica para cada proceso que se lleva a cabo, tanto para la biomasa y el polímero.

Recomendaciones

Para próximos trabajos se sugiere variar la presión en la simulación de diseño para la obtención de gas de síntesis mediante el software se eligió un paquete termodinámico de NRTL con Peng-Robinson con el fin de observar los resultados que se obtienen.

Se propone utilizar como energía para los reactores la fracción obtenida de cada proceso con el fin de verificar que tan factibles son las reacciones generadas en el modelamiento simplificado

Variar los flujos de biomasa y policarbonato con el objetivo de obtener mayor cantidad de gas de síntesis.

Utilizar un reflujo de la salida del proceso de separación de la fracción líquida hacia el proceso de pirólisis para descomponer los hidrocarburos en trazas pequeñas y no desperdiciar materia.

Bibliografía

- Aasberg-Petersen, K., Christensen, T. S., Dybkjær, I., Sehested, J., Østberg, M., Coertzen, R. M., Keyser, M. J., & Steynberg, A. P. (2004). Synthesis gas production for FT synthesis. En *Studies in Surface Science and Catalysis* (Vol. 152, pp. 258-405). Elsevier Inc. [https://doi.org/10.1016/s0167-2991\(04\)80461-0](https://doi.org/10.1016/s0167-2991(04)80461-0)
- Antón Loor, Á. S., & Torres Bustos, A. G. (2020). *Determinación de la cinética de reacción en la producción de furfural partiendo decascarilla de arroz mediante simulación con Aspen Plus*. Universidad de Guayaquil.
- Antonakou, E. V., Kalogiannis, K. G., Stefanidis, S. D., Karakoulia, S. A., Triantafyllidis, K. S., Lappas, A. A., & Achilias, D. S. (2014). Catalytic and thermal pyrolysis of polycarbonate in a fixed-bed reactor: The effect of catalysts on products yields and composition. *Polymer Degradation and Stability*, 110, 482-491. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.10.007>
- Apaydin-Varol, E., Polat, S., & Putun, A. E. (2014). Pyrolysis kinetics and thermal decomposition behavior of polycarbonate - a TGA-FTIR study. *Thermal Science*, 18(3), 833-842. <https://doi.org/10.2298/TSC11403833A>
- Bajus, M. (2010). Pyrolysis of Woody Material. *Petroleum & Coal*, 52(3), 207-214.
- Basu, P. (2010). *Biomass gasification and pyrolysis: Practical Design and Theory* (Oxford). ELSEVIER. https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=QSypbUSdkikC&oi=fnd&pg=PP1&dq=BASU,+P.+Biomass+gasification+and+Pyrolysis,+Practical+Design.+ELSEVIER,+Oxford,+Reino+Unido,+2010&ots=Vh_n5blond&sig=tbTug3Yq7BIZV3U_9dLqXo5Xkx0#v=onepage&q=biosyngas&f=false
- Bautista, F., & Palacio, G. (2005). Caracterización y Manejo de los Suelos de la Península de Yucatán. En ... *de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, ...* <https://books.google.com.ec/books?id=ywZn3->

HeMEkC&pg=PA271&dq=que+es+la+celulosa.+hemicelulosa,+lignina&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjVINfX_4T4AhVOoHIEHXmMD6kQ6AF6BAgEEAI#v=onepage&q=que es la celulosa. hemicelulosa%2C lignina&f=false

- Borrero-López, A. M., Masson, E., Celzard, A., & Fierro, V. (2018). Modelling the reactions of cellulose, hemicellulose and lignin submitted to hydrothermal treatment. *Industrial Crops and Products*, 124, 919-930. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.08.045>
- Chong Obando, H. W. (2018). Análisis para la obtención de energía eléctrica utilizando un Gasificador de Biomasa. En *UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL*.
- Ebewele, R. O. (2000). Polymer science and technology. En *Polymer Science and Technology*. CRC Press. [https://doi.org/10.1016/0261-3069\(95\)90127-2](https://doi.org/10.1016/0261-3069(95)90127-2)
- Ferdous, D., Dalai, A. K., Bej, S. K., & Thring, R. W. (2002). Pyrolysis of lignins: Experimental and kinetics studies. *Energy and Fuels*, 16(6), 1405-1412. <https://doi.org/10.1021/ef0200323>
- Ghasem, N. (2011). Computer Methods in Chemical Engineering. En *Computer Methods in Chemical Engineering* (2a ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b12815>
- Kim, H., & Macosko, C. W. (2009). Processing-property relationships of polycarbonate/graphene composites. *Polymer*, 50(15), 3797-3809. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2009.05.038>
- Lestinsky, P., & Palit, A. (2016). Wood Pyrolysis Using Aspen Plus Simulation and Industrially Applicable Model. *GeoScience Engineering*, 62(1), 11-16. <https://doi.org/10.1515/gse-2016-0003>
- Liu, X., Burra, K. R. G., Wang, Z., Li, J., Che, D., & Gupta, A. K. (2021). Influence of char intermediates on synergistic effects during co-pyrolysis of pinewood and polycarbonate. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*, 143(5). <https://doi.org/10.1115/1.4049464>
- Lopez, J. S., Dagle, V. L., Deshmane, C. A., Kovarik, L., Wegeng, R. S., & Dagle, R. A. (2019). Methane and ethane steam reforming over MgAl₂O₄-supported Rh and Ir

- catalysts: Catalytic implications for natural gas reforming application. *Catalysts*, 9(10).
<https://doi.org/10.3390/catal9100801>
- Martinez, V., Alonso, P., Salado, M., & Rocha, J. (2000). Simulación de Procesos en Ingeniería Química | Victor Hugo en PDF. En *México* (1 th).
[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=yqCcMOy81JEC&oi=fnd&pg=PA11&dq=Martínez,+V.,+Alonso,+P.,+López,+J.,+Salado,+M.,+%26+Rocha,+J.+A.+\(2000\).+Simulación+de+Procesos+en+Ingeniería+Química+\(1th+ed.\).+Plaza+y+Valdés+Editores.&ots=giNUYZQMsm&sig=2Y6gz9g](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=yqCcMOy81JEC&oi=fnd&pg=PA11&dq=Martínez,+V.,+Alonso,+P.,+López,+J.,+Salado,+M.,+%26+Rocha,+J.+A.+(2000).+Simulación+de+Procesos+en+Ingeniería+Química+(1th+ed.).+Plaza+y+Valdés+Editores.&ots=giNUYZQMsm&sig=2Y6gz9g)
- McCabe, W., Smith, J., & Harriott, P. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química* (7ma). McGraw-Hill.
- Mojaver, M., Azdast, T., & Hasanzadeh, R. (2021). Assessments of key features and Taguchi analysis on hydrogen rich syngas production via gasification of polyethylene, polypropylene, polycarbonate and polyethylene terephthalate wastes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(58), 29846-29857.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.161>
- Naik, S. N., Goud, V. V., Rout, P. K., & Dalai, A. K. (2010). Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 14, Número 2, pp. 578-597). Pergamon.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.003>
- Natesakhawat, S. (2005). *Investigation of Active Sites and Reaction Networks in Catalytic Hydrogen Production : Steam Reforming of Lower*.
- Nogués, F., García, D., & Rezeau, A. (2010). *Energía de la Biomasa (volumen I) | Mendeley*.
[https://www.mendeley.com/search/?page=1&query=Energía de la Biomasa %28volumen I%29&sortBy=relevance](https://www.mendeley.com/search/?page=1&query=Energía+de+la+Biomasa+%28volumen+I%29&sortBy=relevance)
- Quiñonez, E., & Zevallos, A. (2021). *Diseño de una planta de producción de resina fenólica (espuma floral)*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Rostrup-Nielsen, J., & Christiansen, L. J. (2011). Concepts in Syngas Manufacture (Catalytic Science). En *Catalytic Science Series*.

- Sanchez Quezada, J. P., Soler Herrero, J., & Herguido, J. (2018). Hidrólisis ácida de cáscaras de vaina de cacao CCN-51. *Jornada de Jóvenes Investigadores del I3A*, 6. <https://doi.org/10.26754/jji-i3a.201802845>
- Sandoval, E. (2007). *Diseño de guía para especificación de hornos de refinería y simulación por HTRI-Xfh - PDF Descargar libre*. <https://docplayer.es/3101515-Diseno-de-guia-para-especificacion-de-hornos-de-refineria-y-simulacion-por-htri-xfh.html>
- Scott Fogler, H. (2008). *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas Cuarta edición* (Número September). Prentice Hall. https://www.academia.edu/34463230/Fogler_Tercera_Edición
- Seider, undefined, Seader, undefined, Lewin, undefined, & Widagdo, undefined. (2009). *product and process Design Principles. 3 ed*, 1689-1699.
- Serrano, J., Mejía, W., Ortiz, J., Sánchez, A., & Zalamea, S. (2017). Determinación del Potencial de Generación Eléctrica a Partir de Biomasa en el Ecuador. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas.*, 41-61. <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/quimica/article/view/1592/1252>
- Seymour, R. B., & Carraher, C. E. (1995). *Introducción a la química de los polímeros*. Reverté. [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=FOobaAs4Wp4C&oi=fnd&pg=PR28&dq=introducción+a+la+química+de+los+polímeros.+Reverté.&ots=2s-YylwEC1&sig=SIToegZEBmgsGSiQ4YPXCG2qsAw#v=onepage&q=Introducción a la química de los polímeros. Reverté.&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=FOobaAs4Wp4C&oi=fnd&pg=PR28&dq=introducción+a+la+química+de+los+polímeros.+Reverté.&ots=2s-YylwEC1&sig=SIToegZEBmgsGSiQ4YPXCG2qsAw#v=onepage&q=Introducción+a+la+química+de+los+polímeros.+Reverté.&f=false)
- Singh, B., & Sharma, N. (2008). Mechanistic implications of plastic degradation. En *Polymer Degradation and Stability* (Vol. 93, Número 3, pp. 561-584). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2007.11.008>
- Vargas Afanador, C., & Pimiento, R. (2007). Química verde en el siglo XXI; química verde, una química limpia. *Revista Cubana de Química*, XIX(1).
- Vargas, E. O., & Pimiento, L. P. (2007). QUÍMICA VERDE EN EL SIGLO XXI ; QUÍMICA. *Revista Cubana de Química*, XIX(1), 29-32.

Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5), 913-933.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>

Wang, J., Jiang, J., Wang, X., Wang, R., Wang, K., Pang, S., Zhong, Z., Sun, Y., Ruan, R., & Ragauskas, A. J. (2020a). Converting polycarbonate and polystyrene plastic wastes into aromatic hydrocarbons via catalytic fast co-pyrolysis. *Journal of Hazardous*

Materials, 386(16), 121970. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121970>

Wang, J., Jiang, J., Wang, X., Wang, R., Wang, K., Pang, S., Zhong, Z., Sun, Y., Ruan, R., & Ragauskas, A. J. (2020b). Converting polycarbonate and polystyrene plastic wastes into aromatic hydrocarbons via catalytic fast co-pyrolysis. *Journal of Hazardous*

Materials, 386. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121970>

Anexos