

Puesta en Marcha y Evaluación de una Unidad Piloto de Gasificación Tipo Downdraft

Utilizando Cacota de Cacao

Paula Alejandra Cortés Franco y Luis Manuel Coral Villota

Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Químico

Directora:

Debora Alcida Nabarlatz

PhD. en Ingeniería química

Codirectores:

Juan Sebastián Vecino Mantilla

PhD. en Ingeniería química

Laura Patricia Peñuela Carrillo

Ingeniera química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

Este trabajo de grado se lo dedico con todo mi amor a mi familia, por ser mi inspiración y motivación para seguir adelante, por siempre llenarme de alegrías y por apoyarme en cada uno de mis sueños.

Se lo dedico en especial a mi madre, Ana Lucía Villota Muñoz y a mi padre, Livio Gerardo Coral Rosales por su apoyo incondicional, por todo el esfuerzo que han hecho para que pueda llegar a este punto de la carrera, por ser mi ejemplo de superación, sacrificio y humildad, y en especial, por su bendición que cada día me protege y me lleva por el camino de bien. A mi hermana, Nathalia Coral, por siempre confiar en mí y por todos los momentos compartidos que los llevo en mi corazón.

A mis tías, Rosario y Edilma Villota, por sus consejos, atención y apoyo incondicional. A mis abuelitos, Estella Muñoz y Efraín Coral por su bendición y por ser mi ejemplo de vida. A Laura Basto, por su amor, cariño y en especial, por ser esa voz de aliento que me impulsaba día a día a seguir adelante en el desarrollo de este proyecto. A la selección de Atletismo de la Universidad, por el apoyo en estos años de carrera y a todos sus integrantes por su buena amistad, los momentos de alegría y las experiencias compartidas. A todas y cada una de las personas que han sido parte de mi formación personal y profesional a lo largo de los años de mi vida. Mil gracias.

Luis Manuel Coral Villota

A Dios, por darme fortaleza y sabiduría en este proceso. A mis padres, Armando Cortes y Bibiana Franco, quienes son mi mayor fuente de inspiración y continuamente me brindan su apoyo y amor incondicional. Gracias por siempre guiarme y motivarme en cada uno de mis proyectos. A mi familia por su infinito amor, comprensión y aliento, gracias por acompañarme en cada etapa de mi vida. A mis amigos por su valiosa amistad, por brindarme su apoyo incondicional, cariño y consejos.

Paula Alejandra Cortés Franco

Agradecimientos

A la Doctora **DÉBORA ALCIDA NABARLTAZ**, directora del proyecto, por su mentoría, apoyos brindados y gestión en los recursos necesarios para el desarrollo del proyecto.

A la Ingeniera Química **LAURA PATRICIA PEÑUELA CARRILLO** y al Doctor **JUAN SEBASTIÁN VECINO MANTILLA**, codirectores del proyecto, por su acompañamiento, orientación y dedicación para sacar adelante este proyecto.

Al Doctor **YESID JAVIER RUEDA ORDOÑEZ** por su orientación, enseñanza, disposición y constante colaboración en el desarrollo del proyecto.

Al grupo de investigación **INTERFASE** por la disposición de sus materiales y equipos, y a sus integrantes por el acompañamiento y aprendizaje adquirido en la fase experimental.

A la **UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER** por la formación profesional y personal en estos años de carrera Universitaria.

A los Ingenieros **OMAR SERRANO** y **RANDY MONTAÑEZ**, profesionales de OIL DIVISION S.A.S por la construcción del equipo y acompañamiento para el arreglo del mismo.

Al grupo de investigación **GIFTEX**, por el suministro de la cáscara de cacao y por el préstamo de los equipos necesarios para el tratamiento de la misma.

A **EDUARDO CARREÑO** y **WILSON CARREÑO**, técnicos del laboratorio de procesos de la Escuela de Ingeniería Química por su acompañamiento y disposición.

Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos	15
1.1. Objetivo General	15
1.2. Objetivos Específicos.....	15
2. Marco Conceptual y Estado del Arte	16
2.1. Características Fisicoquímicas de la Materia prima	16
2.1.1 Análisis Próximo por Termogravimetría	16
2.1.2 Análisis Elemental	16
2.1.3 Poder Calorífico	16
2.2 Procesos de Conversión	17
2.2.1 Gasificación	18
2.2.1.1 Secado	18
2.2.1.2 Pirólisis.	18
2.2.1.3 Combustión.	19
2.2.1.4 Reducción.	19
2.2.2 Tipos de Gasificadores.....	20
2.2.3 Gasificador Downdraft Tipo Imbert	20
2.2.4 Sistema de Limpieza	21
2.2.5 Efecto de la Temperatura	22

2.2.6 Eficiencia del Gas Frío (por sus Siglas en Inglés: CGE)	22
2.2.7 Factores que Afectan el Proceso de Gasificación	23
2.2.7.1 Razón de Equivalencia (ER).....	23
2.2.7.2 Contenido de Humedad y Cenizas.....	24
2.2.7.3 Tamaño de Partícula.	25
2.2.7.4 Agente Gasificante.....	25
3. Metodología	26
3.1. Descripción de la Unidad Piloto	26
3.1.1. Alimentación del Agente Gasificante	27
3.1.2. Gasificador.....	28
3.1.3. Sistema de Limpieza del Gas de Síntesis.....	28
3.1.4. Caracterización de Productos.....	30
3.2. Puesta en Marcha de la Unidad Piloto	30
3.2.1. Protocolos de Operación y Seguridad.....	30
3.2.2. Pruebas Preliminares.....	30
3.2.3. Modificación del Diseño del Equipo	31
3.3. Caracterización Biomasa	31
3.3.1. Análisis Próximo.....	31
3.3.2. Análisis Elemental	31
3.3.3. Poder Calorífico	31
3.4. Desarrollo Experimental	32
3.5 Cuantificación y Caracterización del Alquitrán.....	33
3.6 Cuantificación y Caracterización del Biochar.	34

4. Resultados y Discusión	34
4.1 Caracterización de la Biomasa.....	34
4.2. Puesta en Marcha de la Unidad Piloto	36
4.2.1. Modificación del Diseño Inicial.....	36
4.2.2. Pruebas Preliminares.....	37
4.3. Evaluación de la Influencia de la ER en los Productos de Gasificación	37
4.3.1. Perfil de Temperatura	38
4.3.2. Efecto de la ER sobre la Composición del Syngas	40
4.3.3. Balance de Masa del Proceso de Gasificación.....	41
4.3.4. Caracterización de Subproductos de la Gasificación.....	43
4.3.4.1 Caracterización del Biochar	44
4.3.4.2 Caracterización del Alquitrán.	44
5. Conclusiones.....	46
6. Recomendaciones	47
Referencias Bibliográficas	48
Apéndices.....	54

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Caracterización de la Cáscara de Cacao (clon FEC-2).</i>	34
Tabla 2. <i>Evaluación del Rendimiento del Proceso con Respecto a la ER</i>	42
Tabla 3. <i>Resultados del Análisis Próximo y el Poder Calorífico del Biochar</i>	44
Tabla 4. <i>Propiedades Fisicoquímicas del Alquitrán</i>	44

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Gasificador Downdraft Tipo Imbert</i>	21
Figura 2. <i>Metodología Desarrollada en el Proyecto</i>	26
Figura 3. <i>Unidad Piloto de Gasificación Tipo Downdraft</i>	27
Figura 4. <i>Sistema de Limpieza Alquitrán</i>	29
Figura 5. <i>Acondicionamiento de la Materia Prima</i>	32
Figura 6. <i>Variación de Temperatura del Reactor y LHV del Syngas obtenido durante la Gasificación utilizando $ER=0,29$</i>	38
Figura 7. <i>Efecto de la ER sobre el perfil de temperatura en las tres zonas del reactor</i>	39
Figura 8. <i>Efecto de la ER sobre la Composición del Syngas y poder Calorífico (LHV)</i>	40
Figura 9. <i>Resultados del Rendimiento de los Productos de Gasificación con Respecto a la Variación en la ER</i>	43

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. <i>Protocolo de funcionamiento del gasificador</i>	54
Apéndice B. <i>Curvas de secado de la biomasa</i>	67
Apéndice C. <i>Cálculo de la fórmula molecular de la biomasa</i>	69
Apéndice D. <i>Caracterización de la cacota de cacao como materia prima</i>	70
Apéndice E. <i>Cálculo de Aire Requerido</i>	73
Apéndice F. <i>Cálculos Balance de Masa</i>	75
Apéndice G. <i>Curvas de TGA del Biochar</i>	77

Siglas

CGE: Cold Gas Efficiency (Eficiencia de gas en frío)

Daf: Dry ash free (Seco y libre de cenizas)

ER: Equivalence Ratio (Relación de equivalencia)

HHV: Higher Heating Value (Poder calorífico superior)

LHV: Lower Heating Value (Poder calorífico inferior)

Resumen

Título: Puesta en marcha y evaluación de una unidad piloto de gasificación tipo downdraft utilizando cascota de cacao.*

Autores: Luis Manuel Coral Villota, Paula Alejandra Cortés Franco.**

Palabras clave: Gasificación, downdraft, cáscara de cacao, relación de equivalencia.

Descripción

En Colombia se producen alrededor de 69 mil toneladas de cacao al año, siendo la cáscara de cacao un residuo agrícola que representa entre el 52 y 70% del peso húmedo del fruto, por lo que se ve la necesidad de utilizar una tecnología atractiva para la conversión de residuos agrícolas a productos con mayor valor agregado. Este proyecto de investigación tiene como objetivo evaluar el funcionamiento de la unidad piloto de gasificación tipo downdraft utilizando cascota de cacao, (CLON FEC-2). Se realizó el acondicionamiento de la materia prima, garantizando un tamaño de partícula entre 4,75-9,45 mm y una humedad del 6,64% (g de agua/g de biomasa), con la finalidad de evaluar su funcionamiento con respecto a la relación de equivalencia (ER), utilizando aire como agente gasificante.

Durante la puesta en marcha se establecieron los protocolos de operación y seguridad del equipo para verificar el correcto funcionamiento de la unidad piloto y así garantizar la reproducibilidad de las pruebas. Los estudios se llevaron a cabo utilizando tres niveles de ER (0,15-0,22-0,29), y se obtuvo que, al incrementar la ER, la temperatura en la zona de combustión pasó de 628 a 717°C, mostrando también un incremento en la fracción molar de H₂ y CO de 9,12-12,22% y 7,34-10,76% en el syngas, respectivamente. Para valores de ER igual a 0,22 y 0,29, se obtienen tiempos de operación alrededor de los 45 minutos y se genera un syngas con un poder calorífico inferior (LHV) igual a 4,23 y 3,84 MJ/Nm³, respectivamente, en cambio, para el valor de ER igual a 0,15, se encuentra un LHV menor igual a 3,58 MJ/Nm³, una relación H₂/CO, igual a 1,26 y un tiempo de operación alrededor de los 80 minutos.

A partir de los resultados obtenidos, la cáscara de cacao demuestra un alto potencial para ser utilizada como biocombustible sólido en procesos de gasificación.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Directora: PhD. Debora Alcida Nabarlatz
Codirectores: PhD. Juan Sebastián Vecino Mantilla, Ing. Laura Patricia Peñuela Carrillo

Abstract

Title: Start-up and evaluation of a downdraft gasification pilot unit using cocoa pod husk.*

Autores: Luis Manuel Coral Villota, Paula Alejandra Cortés Franco.**

Palabras clave: Gasification, downdraft, cocoa pod husk, equivalence ratio

Description:

In Colombia, around 69 thousand tons of cocoa are produced per year, and cocoa pod husk are an agricultural residue that represents between 52 and 70% of the wet weight of the fruit, so there is a need to use an attractive technology for the conversion of agricultural residues to products with higher added value. The objective of this research project is to evaluate the operation of the downdraft gasification pilot unit using cocoa pod husk (CLON FEC-2). The conditioning of the raw material was carried out, guaranteeing a particle size between 4.75-9.45 mm and a humidity of 6.64% (g of water/ g of biomass), to evaluate its performance with respect to the equivalence ratio (ER), using air as the gasifying agent.

During start-up, equipment operation and safety protocols were established to verify the correct operation of the pilot unit and to ensure the reproducibility of the tests. The studies were carried out using three levels of ER (0.15-0.22-0.29), and it was obtained that by increasing the ER, the temperature in the combustion zone went from 628 to 717°C, also showing an increase in the mole fraction of H₂ and CO of 9.12-12.22% and 7.34-10.76% in the syngas, respectively. For ER values equal to 0.22 and 0.29, operation times around 45 minutes are obtained and a syngas with a lower heating value (LHV) equal to 4.23 and 3.84 MJ/Nm³ is generated, respectively, on the other hand, for ER value equal to 0.15, a lower LHV equal to 3.58 MJ/Nm³ is found, a H₂/CO ratio equal to 1.26 and an operation time around 80 minutes.

According to the results obtained, cocoa pod husk shows a high potential to be used as solid biofuel in gasification processes.

* Degree work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: PhD. Debora Alcida Nabarlatz
Co-directors: PhD. Juan Sebastián Vecino Mantilla, Ing. Laura Patricia Peñuela Carrillo

Introducción

El aumento del consumo energético, el cambio climático y la persistencia de la crisis global por el agotamiento de las fuentes de energía tradicionales, han propiciado desde la ciencia e investigación la incorporación de nuevas tecnologías y la búsqueda de alternativas que permitan disminuir la dependencia de estas reservas energéticas no renovables, las cuales generan un impacto negativo para el ambiente. En este sentido, en Colombia se ha observado un aumento en el desarrollo de proyectos orientados a la generación de energía mediante fuentes no convencionales, con el objetivo de diversificar la matriz energética de Colombia y aumentar su participación en esta desde un 1% en 2018 a un 12% en el 2022 según las proyecciones del Ministerio de Minas y Energía (Ministerio de Minas y Energía, C., & Banco interamericano de Desarrollo, B., 2021).

Colombia, debido a su posición geográfica, posee condiciones adecuadas para el cultivo de cacao. Durante los últimos años se ha presentado un crecimiento en materia de producción de cacao, de acuerdo con la Federación Nacional de Cacaoteros la producción pasó de 37.202 a 69.040 toneladas entre 2011 y 2021. El departamento de Santander es el mayor productor de cacao a nivel nacional con una participación del 41% en el mercado, correspondiente a 28.037 toneladas para el año 2021 (Federación Nacional de Cacaoteros , 2022).

Se estima que de esta producción aproximadamente el 80% del fruto se descarta como residuo, entre los cuales la mayor cantidad corresponde a la cacota de cacao la cual es un residuo de la poscosecha de cacao (Vásquez et al., 2019). Teniendo en cuenta el volumen de producción, la cacota de cacao representa entre el 52% y el 70% del peso húmedo del fruto (Martínez et al., 2015). En Colombia, los agricultores la utilizan como material de fertilización del suelo o como

alimento para ganado, sin embargo, al no recibir un control adecuado, al volumen de material desechado y a su lenta degradación, esto genera problemas como acidificación de los suelos, emisión de gases de efecto invernadero, proliferación de microorganismos patógenos, entre otros, (FAO, 2009). De esta manera, resulta interesante evaluar el uso de alguna tecnología de procesos de conversión de residuos a energía, con el objetivo de aprovechar el potencial energético de la cacota de cacao y darle un mayor valor agregado.

Actualmente existen diferentes procesos de conversión termoquímica (como combustión, pirólisis, gasificación) que permiten llevar a cabo la transformación energética de la biomasa. Entre ellos, la gasificación ha venido tomando impulso en los últimos años debido a que es una tecnología limpia con bajo costo de instalación y que permite reducir costos en producción de energía y tratamiento de residuos (IEA Bioenergy, 2020).

La gasificación se puede llevar a cabo bajo diferentes configuraciones que determinan la forma en la que se ponen en contacto la biomasa y sus productos (sólido y gas). Entre los gasificadores de uso común se encuentran los de lecho fijo, los cuales (según la ubicación de salida del gas de síntesis) se clasifican en gasificadores de corriente ascendente (updraft) o de corriente descendente (downdraft). Este último es el más adecuado para aplicaciones a pequeña escala (<10 MWh) por su bajo costo y baja tasa de producción de impurezas que acompañan al gas (Radenahmad et al., 2020).

Teniendo en cuenta lo anterior y considerando que se busca aprovechar la cacota de cacao generada como residuo agroindustrial en el departamento de Santander mediante un proceso de gasificación de tipo downdraft, se plantea como pregunta de investigación de este trabajo: ¿Cuál es el efecto de la relación de equivalencia en un gasificador tipo downdraft para la producción de gas de síntesis de calidad a partir de cacota de cacao?

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Evaluar el funcionamiento de una unidad piloto de gasificación tipo downdraft alimentada con cacota de cacao del departamento de Santander.

1.2. Objetivos Específicos

Establecer los protocolos de operación y de seguridad que garanticen el correcto funcionamiento de una unidad piloto de gasificación tipo downdraft.

Evaluar el efecto de la relación de equivalencia ER sobre el funcionamiento de un gasificador tipo downdraft para la obtención de gas de síntesis a partir de cacota de cacao.

2. Marco Conceptual y Estado del Arte

2.1. Características Fisicoquímicas de la Materia prima

La cáscara o cacota de cacao es un residuo agrícola lignocelulósico procedente del proceso de poscosecha de cacao. Para evaluar su potencial energético y ser utilizada en procesos de gasificación, es necesario realizar los siguientes análisis con el fin de conocer sus características fisicoquímicas, las cuales impactan en la calidad y rendimiento de los productos formados.

2.1.1 Análisis Próximo por Termogravimetría

El análisis próximo se realiza siguiendo la norma ASTM E1131-08, mediante un análisis termogravimétrico se determina el material volátil (lo cual corresponde a la fase gaseosa que se genera por la degradación térmica de la biomasa), carbono fijo (el carbono restante después de liberar el material volátil), contenido de humedad y las cenizas, lo cual hace referencia al material inorgánico que no reacciona (De et al., 2018).

2.1.2 Análisis Elemental

Permite determinar el porcentaje en peso de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno (CHONS) del material orgánico, donde el carbono seguido del hidrógeno representa la mayor contribución a su característica de biocombustible (Rueda & Tannous, 2017). A partir de este análisis, se puede obtener la fórmula empírica molecular de la biomasa, indispensable para obtener la cantidad de oxígeno estequiométrica que se alimenta al proceso.

2.1.3 Poder Calorífico

Es la cantidad de energía liberada por la biomasa cuando se realiza el proceso de combustión con oxígeno, el cual es proporcional a los enlaces carbono-carbono presentes en su estructura (UPME, 2005). Su medición realiza mediante una bomba calorimétrica donde se obtiene

el valor de poder calorífico superior (HHV), el cual corresponde a la energía liberada en la combustión más el calor latente contenido en el vapor del agua, y un poder calorífico inferior (LHV), el cual sólo hace referencia a la energía liberada en la combustión (Fernández, 2011). Donde el HHV es proporcionado mediante una bomba calorimétrica y el LHV se lo calcula mediante la siguiente ecuación:

$$LHV = HHV - 212,2 \times H_{b.s} - 0,8 \times (O_{b.s} + N_{b.s}) \quad (Ec.1)$$

Siendo $H_{b.s}$, $O_{b.s}$ y $N_{b.s}$, la fracción másica de hidrógeno, oxígeno y nitrógeno en el combustible respectivamente, y HHV en kJ/kg (Martínez et al., 2015).

2.2 Procesos de Conversión

Dentro de los procesos para convertir biomasa en productos sólidos, líquidos o gaseosos con un mayor valor agregado, se encuentran principalmente los procesos de conversión fisicoquímica, bioquímica y termoquímica. Respecto a estos últimos, consisten en conversión de la biomasa mediante un conjunto de reacciones que requieren la presencia de un agente gasificante y una atmósfera controlada. A partir de estos procesos se obtiene como producto gas de síntesis, y como subproductos una parte sólida (char o carbón) y otra líquida (aceites pirólíticos).

Los procesos termoquímicos de conversión de biomasa más estudiados son pirólisis, combustión y gasificación; sin embargo, siguiendo el análisis del contenido de sustancias inorgánicas de las cenizas reportado en literatura para la cacota de cacao, se tiene que ésta presenta un alto contenido de K_2O (alrededor del 60% en peso de las cenizas), siendo este una limitante en procesos de combustión y pirólisis debido a implicaciones técnicas por la aparición de fenómenos como aglomeración y sinterizado (Martínez, et al. 2015).

En consecuencia, con el objetivo de la valorización de los residuos, disminuir la emisión de gases de efecto invernadero, y utilizar una tecnología limpia para la generación de un gas de

síntesis y ser utilizado en celdas de combustible, se considera a la gasificación como el proceso de conversión más competitivo debido a su practicidad y bajo costo de operación (Narnaware & Panwar 2022).

2.2.1 Gasificación

El proceso de gasificación consiste en la conversión de materia prima sólida en un combustible gaseoso útil que puede ser utilizado para la generación de energía y electricidad o como materia prima en la síntesis de productos químicos con valor agregado (De et al., 2018).

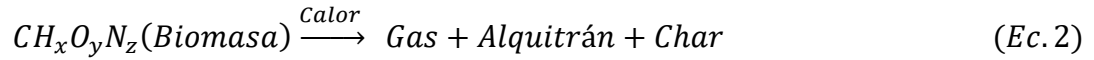
En este proceso, la biomasa reacciona con una cierta cantidad de agente gasificante en defecto estequiométrico, con el fin de generar una serie de reacciones y convertirla en un combustible gaseoso conocido como syngas. El syngas producido es una mezcla de gases H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , N_2 y O_2 (Molino et al., 2016).

El proceso de gasificación de biomasa ocurre en 4 etapas: secado, pirólisis, combustión y gasificación, las cuales serán explicadas en detalle a continuación.

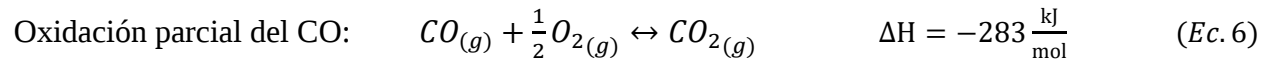
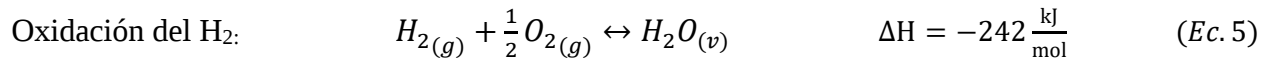
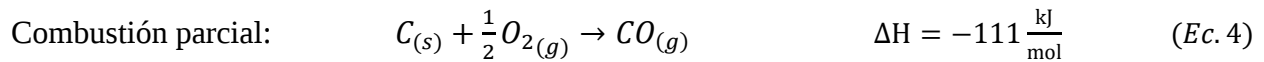
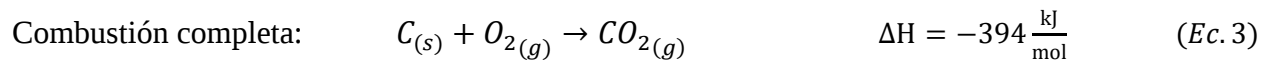
2.2.1.1 Secado. Durante esta etapa se remueve la humedad presente en la materia prima, utilizando la energía liberada en la combustión. La temperatura en esta zona se encuentra entre los 100-200°C, obteniendo como resultado la biomasa seca y vapor de agua (Gasification Theory and Modeling of Gasifiers, 2010).

2.2.1.2 Pirólisis. Es la etapa previa a los procesos de combustión y gasificación; generalmente la temperatura en la zona de pirólisis está entre 200-600°C e involucra la descomposición térmica de las grandes moléculas de hidrocarburos de biomasa en moléculas más pequeñas en ausencia de oxígeno.

Durante esta etapa se obtienen tres productos principales, los cuales son: alquitrán, char y gases como CO, CO₂, H₂, H₂O y CH₄ (Anukam et al., 2016). El proceso de pirólisis se describe mediante la siguiente reacción.



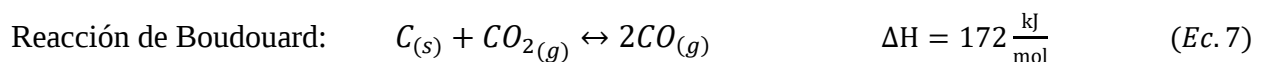
2.2.1.3 Combustión. En esta zona se alimenta el oxígeno necesario para generar la combustión, dando como resultado la formación de CO₂ y H₂O, cuyas cantidades dependen directamente de la composición de la biomasa. La temperatura en esta zona está entre 800-1100°C y el calor liberado es utilizado para las reacciones de secado, pirólisis y reducción. (Anukam et al., 2016). Las reacciones que principalmente se dan en esta zona son:

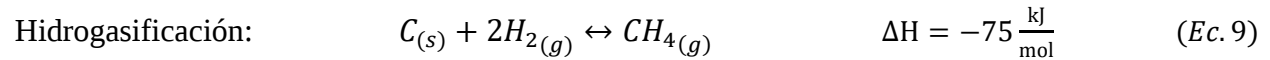
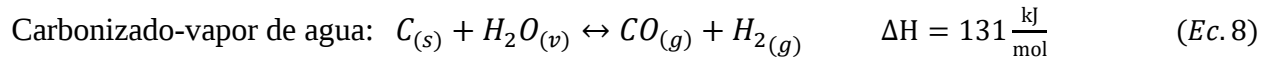


2.2.1.4 Reducción. Es la etapa principal de este proceso; el rango de temperaturas de este se encuentra entre 600-1100°C. El proceso de gasificación ocurre cuando el carbón generado en etapas previas (pirólisis y oxidación) reacciona con el dióxido de carbono y vapor de agua dando como resultado la producción del syngas. En esta etapa pueden ocurrir reacciones simultáneas tanto en fase homogénea (gas-gas), como en fase heterogénea (sólido-gas) (Zhang et al., 2020).

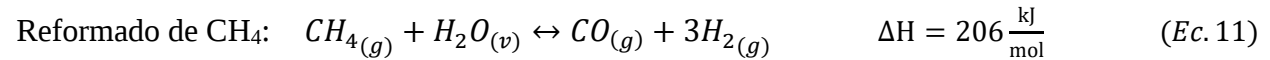
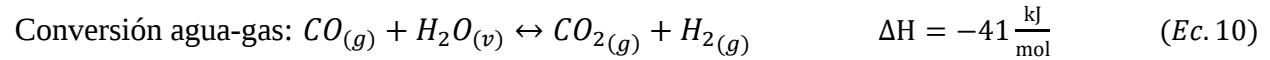
Las reacciones que se presentan durante el proceso de gasificación se muestran a continuación:

Reacciones heterogéneas:





Reacciones homogéneas:



2.2.2 Tipos de Gasificadores

Los gasificadores se dividen en tres grupos principales de acuerdo con la dirección de flujo del combustible y el agente gasificante: lecho fijo, lecho fluidizado y lecho de arrastre. Dentro de ellos, los de lecho fijo son los más estudiados y de uso más común debido a su practicidad y fabricación sencilla, además, son adecuados para aplicaciones a pequeña escala de hasta 10 MW y suelen operar a presión atmosférica (Zhang et al., 2020).

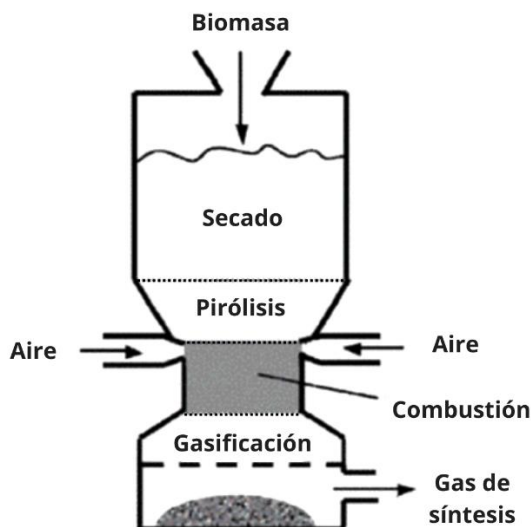
2.2.3 Gasificador Downdraft Tipo Imbert

En este tipo de gasificador (downdraft tipo imbert) la biomasa ingresa por la parte superior mientras que el aire se alimenta en la zona de oxidación a través de boquillas. Generalmente el número de boquillas es impar para que los gases calientes de una boquilla no incidan en la boquilla opuesta. El calor requerido para las zonas de secado, pirólisis y reducción se obtiene en la zona de combustión; en esta zona el dióxido de carbono y vapor de agua producidos reaccionan con el carbón en la zona de reducción donde se produce el gas de síntesis y las cenizas, las cuales caen al fondo del reactor (Basu, 2018).

El área de la sección transversal del gasificador tipo Imbert se reduce en la garganta y posteriormente se expande, esto con el fin de que la zona de combustión esté ubicada en este punto y forzar a todo el gas de pirólisis a pasar a través de la garganta (Basu, 2018).

Figura 1.

Gasificador Downdraft Tipo Imbert



Esquema de un gasificador tipo downdraft tipo garganta. *Adaptado de Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction* (P. 269), por P. Basu, 2018, Londres: Elsevier.

Derechos de autor Elsevier recuperado de app.knovel.com.

Entre las principales ventajas de los gasificadores downdraft se destaca la baja producción de alquitrán ($0,015\text{-}3\text{ g/Nm}^3$), es un proceso relativamente simple y de bajo costo, y requiere una limpieza mínima de alquitrán en el syngas. Por otro lado, entre las desventajas se destacan una eficiencia térmica relativamente baja y dificultades en el manejo de biomasa con alto contenido de humedad y cenizas (De et al., 2018.)

2.2.4 Sistema de Limpieza

El alquitrán corresponde a los compuestos orgánicos condensables presentes en el syngas. Su concentración en los procesos de gasificación de biomasa depende del diseño del gasificador, la temperatura de operación y el tiempo de residencia del gas, donde usualmente varía entre $1\text{-}15\text{ g/Nm}^3$ (Woolcock & Brown, 2013).

La presencia de alquitrán en el gas de síntesis representa un problema y limita su uso en aplicaciones como combustible y síntesis química. Por lo tanto, con el fin de remover los contaminantes presentes en el syngas se emplean tratamientos de limpieza previos a su uso (Maitlo, G et al., 2022). Las tecnologías del sistema de limpieza de syngas se clasifican en: limpieza de gas caliente (HGC) o limpieza de gas frío (CGC). Los componentes principales del sistema de limpieza de ambas tecnologías corresponden a ciclones, filtros, separadores de partículas, depuradores, y precipitadores electrostáticos (Ruiz, J., 2013).

En la unidad piloto de gasificación tipo downdraft utilizando cacota de cacao se empleó el sistema de limpieza en frío, el cual es sugerido para procesos que operan a temperatura ambiente o bajas temperaturas (Schildhauer & Biollaz, 2016).

2.2.5 Efecto de la Temperatura

Los rangos de temperatura que se alcanzan mediante las reacciones involucradas durante el proceso influyen en la calidad y composición del alquitrán. Además, afectan al rendimiento y características del char, dado que cuando se produce un incremento en la temperatura del proceso se disminuye la proporción de H/C y O/C, lo que conlleva a un aumento del grado de carbonización del char (Zhang et al., 2020).

2.2.6 Eficiencia del Gas Frío (por sus Siglas en Inglés: CGE)

Uno de los parámetros importantes para determinar el rendimiento del proceso de gasificación es la eficiencia del gas en frío (CGE), la cual se define como la relación entre la energía química en el syngas y la energía contenida en la biomasa (Maitlo et al., 2022), y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$CGE = \frac{LHV_{Syngas} * \dot{V}_{syngas}}{LHV_{Biomasa} * \dot{m}_{syngas}} \times 100 \quad (Ec. 12)$$

Donde:

LHV_{Syngas} : Poder calorífico inferior del syngas [MJ/Nm^3]

$LHV_{Biomasa}$: Poder calorífico inferior de la biomasa en [MJ/kg]

$\dot{V}$: Flujo volumétrico del syngas [Nm^3/min]

$\dot{m}$: Flujo másico del syngas [kg/min]

Para gasificadores de lecho fijo, los valores de eficiencia del gas frío se encuentran entre 70 a 88% (Shahabuddin & Alam, 2022).

2.2.7 Factores que Afectan el Proceso de Gasificación

2.2.7.1 Razón de Equivalencia (ER). Relaciona la cantidad de aire alimentado por kg de biomasa, comparándolo con la cantidad de aire necesario para realizar la combustión completa de un kilogramo de biomasa. Esta relación impacta significativamente en la composición del syngas obtenido y es el parámetro más importante en los reactores de lecho fluidizado y lecho fijo. En procesos de gasificación en los cuales se utiliza aire como agente gasificante, los valores óptimos de ER se encuentran entre 0,2 a 0,4 (Radenahmad et al., 2020); un incremento del ER produce un aumento de la tasa de producción de gas y mayores niveles de CO_2 debido a que las reacciones de oxidación prevalecen sobre las demás reacciones porque la cantidad de oxígeno aumenta. Además, implica una disminución en el poder calorífico del gas producido que depende de la concentración del CO , H_2 , y CH_4 presentes en el gas de síntesis (Kumar & Anand, 2019).

$$ER = \frac{\left(\frac{kg \text{ aire}}{kg \text{ biomasa}}\right)_{Alimentado}}{\left(\frac{kg \text{ aire}}{kg \text{ biomasa}}\right)_{Estequiométrica}} \quad (Ec. 13)$$

Awais, M., et al, evaluaron el funcionamiento de un gasificador tipo downdraft utilizando bagazo de caña de azúcar y cáscara de coco. Para el bagazo, la relación de equivalencia (ER) recomendada fue de 0,22, reportando en el syngas un contenido máximo de H_2 y CO del 9,6% y 17,9% respectivamente, y un LHV de $5,4 \text{ MJ/Nm}^3$.

Por otro lado, para una ER de 0,29, el mejor resultado se dio al utilizar cáscara de coco como materia prima, obteniendo un syngas con un contenido máximo del 12,3% de H_2 , 19,3% de CO y un LHV de $6,0 \text{ MJ/Nm}^3$. Los resultados indican que al presentarse una variación en la ER de 0,17 a 0,29, el rendimiento del gas de síntesis presenta un incremento de 1,1 a $2 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ para el bagazo de caña y de 1,1 a $2,6 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ para la cáscara de coco.

2.2.7.2 Contenido de Humedad y Cenizas. La cáscara de cacao contiene una cantidad significativa de humedad (alrededor del 85% en base húmeda), la cual debe reducirse para lograr un mejor desempeño durante el proceso de gasificación (González, 2019).

Para procesos de gasificación, se recomienda que el contenido de humedad (en base húmeda) sea inferior al 30%, siendo el más adecuado entre 10 al 15%, ya que a pesar de que su alto contenido de humedad favorece a la producción de hidrógeno, se necesita mayor energía para evaporarla, lo que reduce la eficiencia térmica del proceso (Pérez et al., 2010). De igual manera, se recomienda analizar el contenido de inorgánicos presentes en las cenizas y a su vez, que su valor sea lo más reducido posible, ya que éstas pueden actuar como catalizadores o inhibidores de las reacciones de pirólisis y reducción, lo cual afecta el comportamiento y también, puede producir problemas de obstrucción en los filtros y erosión en las tuberías (Martínez, 2015).

Jahromi et al. (2021) investigaron el efecto del contenido de humedad del bagazo de caña de azúcar en un gasificador downdraft para lograr el máximo rendimiento del syngas. Los resultados evidenciaron que un aumento en el contenido de humedad de 1,14% a 20%, genera una

reducción en la fracción molar de CO de 20,7 a 17,5% y un aumento en la producción de H₂ de 19,3% a 20,8% y CO₂ de 10,7% a 12,2%.

2.2.7.3 Tamaño de Partícula. Generalmente una disminución en el tamaño de partícula incrementa la conversión de la biomasa debido a que hay una mayor área superficial, impactando la reactividad de la misma durante la gasificación (Shahabuddin & Alam, 2022).

Pérez, J., et. al (2012) realizaron el estudio de los parámetros de operación y diseño (geometría del reactor, contenido de humedad de la biomasa, tamaño de partícula, velocidad superficial del aire) en un reactor tipo downdraft utilizando como materia prima corteza de pino y lodos de depuradora, lograron condiciones óptimas de gasificación para un tamaño de partícula entre 2-6 mm, contenido de humedad del 10,62% y velocidad superficial de 0,06 m/s. Con estas condiciones de operación las variables de respuesta obtenidas en el syngas corresponden a un LHV de 2,966 MJ/Nm³, una concentración de alquitrán de 7,73 g/Nm³ y una composición promedio del gas producto (en fracción molar) de 8% H₂, 13% CO, 1,4% CH₄, 14,9% CO₂ y 62,7% N₂.

2.2.7.4 Agente Gasificante. Los principales agentes gasificantes utilizados en procesos de gasificación son aire, vapor de agua y oxígeno. El agente gasificante seleccionado para este proyecto fue el aire, ya que se utiliza comúnmente en los procesos de gasificación a pequeña escala debido a la facilidad de suministro y bajos costos. Su única limitación es la producción de un syngas con bajo poder calorífico inferior (entre 3 a 7 MJ/Nm³) debido a la dilución del syngas por el N₂ presente en el aire (Havilah et al. 2022).

En trabajos previos relacionados con gasificación de la cascota de cacao, se encontró que Gunasekaran, A.P., et al. utilizaron un gasificador tipo “*open core*”, con el fin de determinar el potencial energético de la cáscara de cacao, evaluando el rendimiento para diferentes ER del agente gasificante y diferentes valores de humedad de la materia prima. Como resultado se obtuvo un

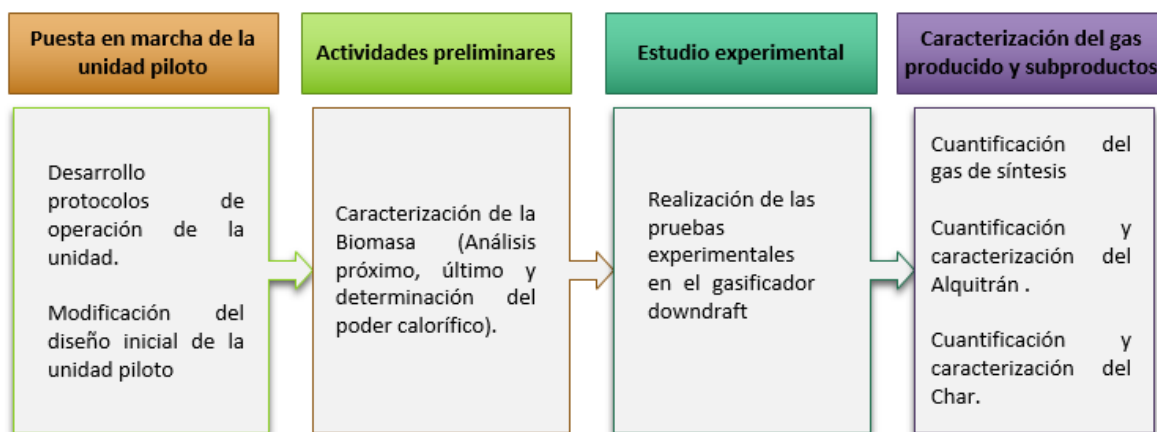
parámetro óptimo de ER igual a 0,25 y una humedad de la biomasa del 5% en base húmeda, obteniendo un LHV igual a 6,13 MJ/Nm³ y una eficiencia del gas frío del 68%, lo que identifica a la cáscara de cacao como una materia prima prometedora para el proceso de gasificación. Aunque en este estudio no se utilizó el mismo tipo de gasificador, sus resultados pueden ser analizados para efectos comparativos. En este sentido, no se han encontrado estudios previos utilizando cáscara de cacao como materia prima en un gasificador tipo downdraft.

3. Metodología

En la figura 2 se plantea la ruta metodológica para el desarrollo del estudio.

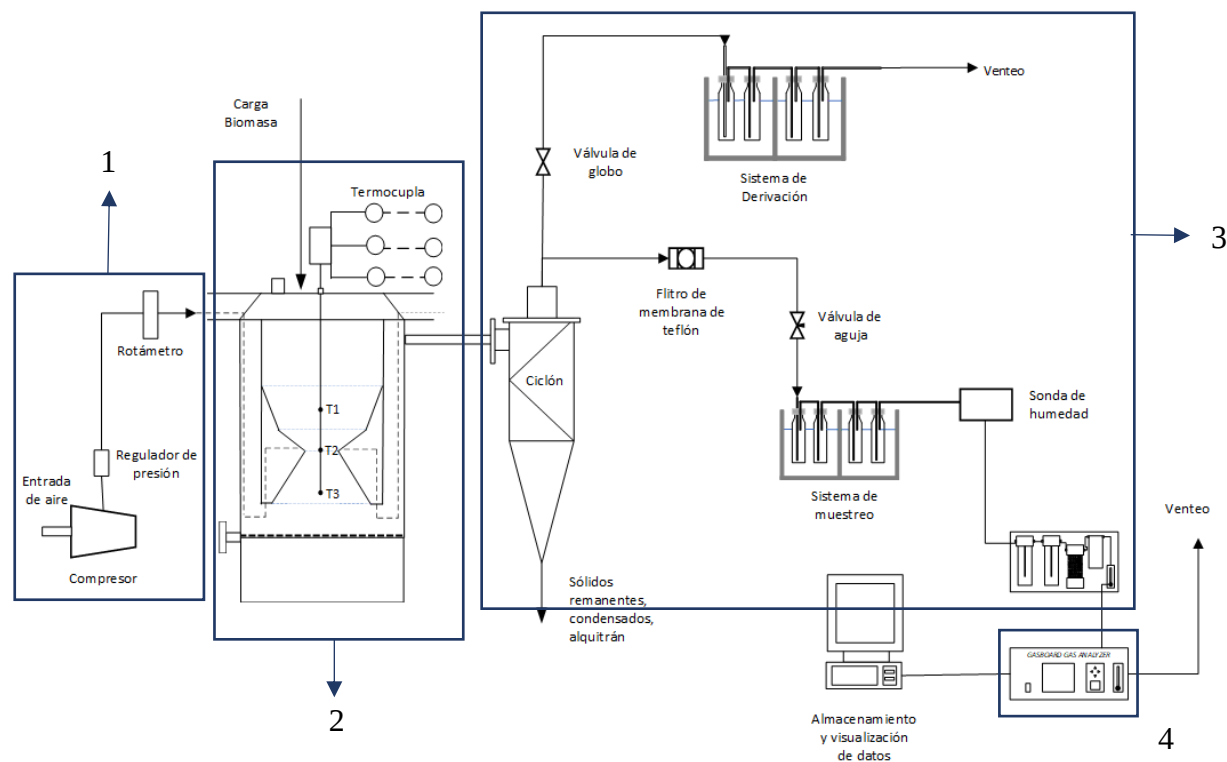
Figura 2.

Metodología Desarrollada en el Proyecto



3.1. Descripción de la Unidad Piloto

El diseño del gasificador tipo downdraft fue realizado en el marco del proyecto 2684 financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander (UIS). La unidad piloto de gasificación utilizada para llevar a cabo el desarrollo del proyecto se detalla en la Figura 3.

Figura 3.*Unidad Piloto de Gasificación Tipo Downdraft*

En el proceso de gasificación se tienen en cuenta las siguientes etapas: alimentación del agente gasificante (1), reactor de gasificación (2), sistema de limpieza syngas (3), caracterización de productos (4).

3.1.1. Alimentación del Agente Gasificante

El agente gasificante utilizado fue aire, el cual es suministrado por inyección desde la zona superior hasta la altura de la garganta a través de 5 boquillas periféricas de $\frac{1}{2}$ pulgada. El flujo de aire alimentado al reactor correspondió a 13, 19 y 25 L/min, teniendo en cuenta el parámetro de gasificación de relación de equivalencia ER.

El flujo de aire es suministrado al gasificador por medio de un compresor de pistón lubricado ELECTROMECH Z-08, el cual posee una capacidad del tanque de 24 Gal y una potencia

de motor de 2 hp. Para medir el flujo de aire se utilizó un rotámetro con una capacidad máxima de 30 L/min instalado en la entrada del sistema.

3.1.2. Gasificador

El reactor está fabricado en acero inoxidable y fue construido en configuración downdraft tipo Imbert, con altura de 65 cm, diámetro externo de 38 cm y diámetro de garganta de 7 cm. Así mismo, se encuentra soportado por un exoesqueleto que permite extraer un recipiente ubicado en la zona inferior donde serán almacenadas las cenizas. El gasificador opera de forma discontinua, por tanto, la biomasa es alimentada desde la zona superior antes de iniciar cada proceso. En esta misma zona se encuentra el puerto de ignición, donde se introduce un soplete de butano hasta observar gas de combustión blanco en la salida, necesario para iniciar la combustión.

El equipo cuenta con una termocupla con 3 termopares tipo K, las cuales están alineadas en el centro a diferentes alturas (27, 38 y 49 cm) desde la cima del gasificador, donde sus puntos de medición corresponden a la zona de pirólisis, combustión y reducción, respectivamente. Las termocuplas están conectadas con el indicador *4 channel K thermometer SD looger*, lo que permite el registro de temperatura en tiempo real con intervalos de medición de 1 a 5 segundos.

3.1.3. Sistema de Limpieza del Gas de Síntesis

El flujo del syngas sale por la parte inferior del equipo, y asciende por la zona intermedia entre el diámetro externo e interno del gasificador, con el fin de aprovechar su energía para calentar el aire de entrada, posteriormente, pasa a un ciclón en donde se elimina el material particulado y ocurre la primera condensación de vapor de agua y alquitrán, finalmente el syngas atraviesa un filtro de membrana de teflón que permite coleccionar el material particulado fino remanente.

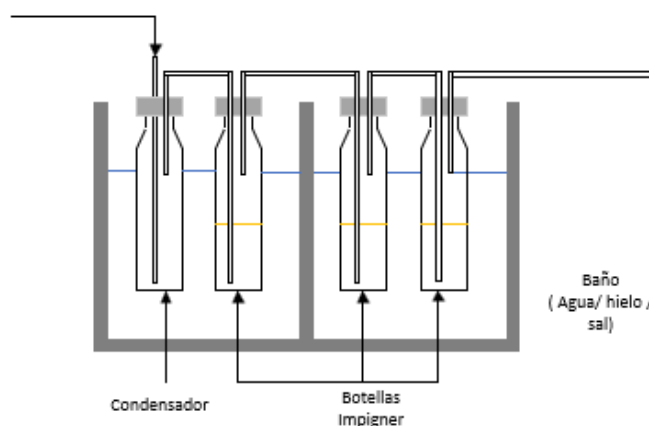
Con el propósito de recuperar el alquitrán producido y realizar la eliminación de impurezas y contaminantes del gas de síntesis, la unidad piloto cuenta con dos sistemas de trampas de

condensación. El primer sistema corresponde a la línea de muestreo por donde pasa la cantidad de flujo a analizar y cada botella impigner cuenta con capacidad de 250 mL, y el segundo sistema corresponde a la línea de derivación por donde pasa la mayor cantidad de flujo y consta de 4 recipientes fabricados en material acrílico con capacidad de 2 L, los cuales son adaptados en serie para su funcionamiento como trampas de condensación utilizando un baño frío de agua como líquido de enfriamiento.

Para el sistema de limpieza se tuvo en cuenta la guía para el muestreo y análisis de alquitrán y partículas en gases producidos durante la gasificación de biomasa desarrollado por la comisión europea (DGXII) (Van de Kamp et al., 2005). El equipo de muestreo se muestra en la figura 5.

Figura 4.

Sistema de Limpieza Alquitrán



En la serie de trampas, la primera botella se deja vacía con el fin de que ocurra la condensación de la mayor porción del alquitrán, posteriormente el syngas pasa a través de una serie de 3 botellas que contienen isopropanol, con el fin de que actúe como agente lavador del syngas generado y permita recuperar el resto del alquitrán no condensado. Para las botellas 2, 3 y

4 se agrega 140 mL de isopropanol para el sistema derivación y 50 mL de isopropanol para el sistema de muestreo en cada botella respectivamente.

3.1.4. Caracterización de Productos

Durante el desarrollo de las pruebas se registraron los datos de humedad con el higrómetro (Vaisala HMT330) y la composición de los gases presentes en el syngas (H_2 , CO, O_2 , N_2 , CH_4 , C_xH_y) y poder calorífico con el Gasboard-3100 Serial Syngas Analyzer de manera continua mientras el equipo se encontraba en funcionamiento.

Este analizador de gas está equipado con un sistema de pre-tratamiento del gas de muestra el cual consta de 2 trampas de agua, 1 filtro de carbón activado y 1 filtro CKD serie 3000 r1/4 0,3 μ m, así como con un medidor de flujo el cual permite que el gas de muestra fluya hacia el sistema a la tasa de flujo necesaria para realizar el análisis (entre 0,7 a 1,2 L/min).

3.2. Puesta en Marcha de la Unidad Piloto

3.2.1. Protocolos de Operación y Seguridad

La unidad piloto de gasificación tipo downdraft se instaló en el Laboratorio 305 del grupo de investigación Interfase. Para dar inicio al desarrollo de las pruebas se establecieron los protocolos de carga, funcionamiento y seguridad de la unidad teniendo en cuenta la metodología de Análisis Funcional de Operabilidad (Hazop) [ver Apéndice A].

3.2.2. Pruebas Preliminares

Una vez instalado, se realizaron las pruebas preliminares para verificar los rangos de condiciones de operación y la reproducibilidad de los datos tomados. Durante el transcurso de cada prueba se realizó el seguimiento de los protocolos de carga, funcionamiento y seguridad de la unidad.

3.2.3. Modificación del Diseño del Equipo

Inicialmente, se identificaron fugas durante la puesta en marcha por lo cual se debió realizar una modificación al diseño inicial del equipo agregando un nuevo sistema de derivación del sistema de limpieza del gas de síntesis.

3.3. Caracterización Biomasa

3.3.1. Análisis Próximo

El análisis próximo se realizó por termogravimetría en un equipo TGA 4000, para determinar el contenido de humedad, volátiles, cenizas y carbono fijo, este último calculado por diferencia. El análisis se realiza en atmósfera inerte de nitrógeno y oxidativa utilizando aire, como resultado se obtienen termogramas de curvas de pérdida de masa (TG). Este análisis se desarrolló en el Laboratorio de análisis térmico del CILIQ de la Escuela de Ingeniería Química.

3.3.2. Análisis Elemental

El análisis elemental se realizó en el Laboratorio instrumental de análisis químico de la Universidad Industrial de Santander. Para ello, la muestra fue previamente secada, molida y tamizada para obtener una distribución de tamaño homogénea (menor a 2 mm). La determinación se realizó utilizando un Analizador Elemental Vario Elcube de Elementar, flujo de gas de arrastre (Helio) de 230 mL/min, y la temperatura de la columna de combustión y reducción fue de 1150 y 850 °C, respectivamente. El contenido de oxígeno se calculó mediante la ecuación.

$$\%O = 100 - \%C - \%H - \%N - \%S \quad (Ec. 14)$$

3.3.3. Poder Calorífico

Para la determinación del poder calorífico del biocombustible sólido se analizaron 2 muestras en el Laboratorio 305 del grupo de investigación Interfase mediante el uso del Calorímetro Isoperibólico 6200, siguiendo la norma UNE-EN ISO 18125.

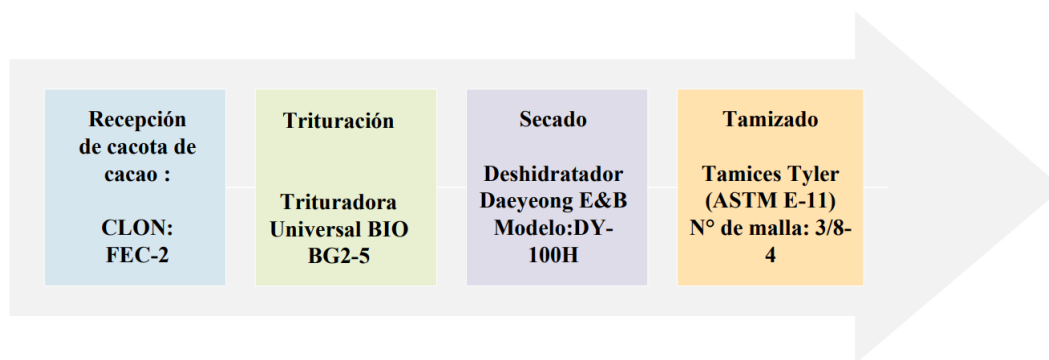
Para la preparación de la muestra, se pesó 1 gramo de la muestra seca y se formó una pastilla mediante el uso de una prensa hidráulica Carver modelo 3912, donde se aplica una presión de 10000 psi durante un tiempo aproximado de 60s. Una vez lista la muestra se colocó dentro de un crisol y se procedió a realizar el respectivo montaje de la bomba en el calorímetro Parr modelo 6200, se ensambló la bomba y se cargó lentamente con oxígeno hasta una presión de 450 psi, la temperatura del recirculador de agua se mantuvo en 25°C.

3.4. Desarrollo Experimental

La cacota de cacao fue provista por el grupo GIFTEX (UIS). Las mazorcas de cacao (CLON FEC-2) utilizadas fueron recolectadas en el municipio de San Vicente del Chucurí, luego se le realizaron las etapas de lavado, desinfección y control de calidad, para posteriormente realizar la separación de los granos, la placenta, el mucílago y la cáscara o cacota de cacao.

Figura 5.

Acondicionamiento de la Materia Prima



Una vez recibida la cacota de cacao, se efectuó el pre-tratamiento de la materia prima el cual consistió en la caracterización, trituración, secado y tamizado de acuerdo con los valores establecidos para tamaño de partícula y humedad. Inicialmente la biomasa se trituró haciendo uso de la trituradora universal BIO BG2-5 Voran con potencia de 150 kW. Posteriormente se realizó el secado de la biomasa durante 32 horas a 65°C en un deshidratador (*Agriculture Dryer*) modelo

DY-110 H Daeyeong E&B hasta llegar al contenido de humedad de equilibrio, teniendo en cuenta los datos experimentales de la curva de secado realizada previamente (ver Apéndice B). Luego triturar y secar la cáscara de cacao se realizó el proceso de tamizado empleando tamices marca TYLER (ASTM E-11) con número de malla 3/8 y 4, con el fin de obtener una distribución del diámetro de partícula entre 4,75-9 mm.

El proceso de gasificación de la cacota de cacao se realizó para evaluar el efecto del ER sobre variables de respuesta como LHV, CGE, relación H_2/CO y temperatura del reactor. Para ello se llevaron a cabo 6 pruebas en total utilizando como materia prima la cacota de cacao (acondicionada previamente) según la relación equivalente (ER) (0,15 - 0,22 - 0,29) por duplicado bajo las mismas condiciones de operación. Para este proceso, se carga el gasificador con 4 kg de cáscara de cacao y se enciende el equipo según el protocolo establecido, donde el rotámetro se ajusta con el fin de asegurar la cantidad específica de aire requerido en cada prueba.

Durante el desarrollo de la prueba, se realiza la medición de temperatura en las tres zonas mencionadas, y el gas producido pasa por el sistema de limpieza para remover partículas sólidas, vapor de agua y alquitrán con el fin de que el éste se encuentre libre de humedad e impurezas para su caracterización. Esta caracterización se realiza de manera continua mientras el equipo está funcionando, registrando la composición de H_2 , CO , O_2 , CO_2 , N_2 , CH_4 , C_nH_m y el poder calorífico mediante el analizador infrarrojo on-line (equipo Gasboard 3100 & 3100 PRO).

3.5 Cuantificación y Caracterización del Alquitrán

Con el fin de cuantificar el alquitrán, la solución alquitrán-isopropanol recolectada de las botellas impigner del sistema de derivación y muestreo, se somete a un proceso de separación del isopropanol mediante un rotoevaporador marca Heidolph G1, a una temperatura de 56°C y un vacío progresivo desde 900 mbar hasta llegar a 200 mbar. Una vez finalizado el proceso se pesan

los balones de destilado y de fondo con el objetivo de determinar la cantidad de alquitrán recuperado.

El pH de las muestras de alquitrán se midió utilizando el medidor portátil Starter 300, y la densidad se midió utilizando un picnómetro de 1 mL. El análisis del poder calorífico se realizó mediante el equipo TGA 4000, siguiendo la norma para medición de biocombustibles líquidos ASTM D240-19.

3.6 Cuantificación y Caracterización del Biochar.

El análisis próximo del biochar se realizó por análisis termogravimétrico y el poder calorífico del biochar se llevó a cabo en una bomba calorimétrica Parr 6200 (por ejemplo, ver análisis próximo y poder calorífico de la biomasa).

4. Resultados y Discusión

4.1 Caracterización de la Biomasa

Los resultados obtenidos para la caracterización de la cáscara de cacao, clon FEC-2, se muestran en la tabla 1, los cuales se pueden observar con mayor detalle en el Apéndice C.

Tabla 1.

Caracterización de la Cáscara de Cacao (clon FEC-2).

Análisis elemental (% en peso, en base seca y libre de cenizas)				
C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)
41,3± 0,20	5,9±0,0	0,7±0,03	0,1±0,0	52±0,24
Análisis próximo (% en peso, en base seca)				
% Volátiles		% Carbono fijo		% Cenizas
75,87		18,65		5,48

Poder calorífico superior [MJ/kg]	*Poder calorífico inferior [MJ/kg]
15,46±0,065	14,11±0,065

* Valor calculado mediante *Ec.1*

A partir del análisis elemental se obtuvo la fórmula empírica molecular de la biomasa: $CH_{1,71}O_{0,95}N_{0,015}$ [ver Apéndice D], la cual se utilizó con el fin de calcular la cantidad de agente gasificante (aire) que se va a alimentar para cada valor de la variable ER.

Se realizó un análisis próximo por TGA para la biomasa fresca, y se obtuvo un porcentaje en masa de humedad (en base húmeda), volátiles y carbono fijo de 82,84±2,02%, 11,46±2,20% y 5,195±4,20% respectivamente [ver Apéndice C]. Debido a su alto contenido de humedad y teniendo en cuenta que se recomienda trabajar con un contenido de humedad inferior al 30% para su aprovechamiento energético (Pérez et al., 2010), se concluye que se debe realizar un tratamiento previo a la biomasa, por lo que ésta se seca hasta alcanzar su humedad de equilibrio [ver curva de secado en Apéndice C], obteniendo los resultados de análisis próximo que se muestran en la tabla 1.

Del análisis próximo se obtiene un contenido de humedad (en base húmeda) igual a 6,64% cabe destacar su alto contenido de compuestos volátiles, correspondiente a hidrocarburos ligeros en forma de gases que luego son liberados durante las etapas de calentamiento y se ven reflejados en la composición del syngas, debido a que un alto contenido del material volátil genera un aumento de la formación de alquitrán durante la gasificación (Maitlo et al., 2022) , para carbono fijo, el cual es la base para las reacciones de oxidación en estado sólido y refleja la producción de biochar en el proceso.

4.2. Puesta en Marcha de la Unidad Piloto

Para el desarrollo de las pruebas se estableció un protocolo de la unidad piloto de gasificación y un manual de seguridad [ver Apéndice A], para garantizar el correcto funcionamiento del equipo y asegurar que se mantengan las condiciones de seguridad adecuadas.

En este protocolo se desarrollan las instrucciones de funcionamiento de cada uno de los equipos que hacen parte de la unidad piloto de gasificación y las cuales se deben seguir para dar un uso y manejo adecuado de los equipos por parte del personal del laboratorio. El protocolo comprende el arranque, funcionamiento, pruebas de fugas y parada del equipo.

4.2.1. *Modificación del Diseño Inicial*

Inicialmente el sistema fue diseñado para trabajar a presiones de entrada de aire inferiores a 5 psi. Sin embargo, al realizar los cálculos de requerimiento de aire necesario para cumplir con los valores de ER propuestos, la presión de entrada de aire correspondía a 30 psi. Al efectuar la primera prueba preliminar se evidenciaron fugas de gas en la tapa debido a los altos flujos de aire que se alimentaban. Además, se presentaba una estrangulación del gas debido a un cambio de diámetro en la tubería de 1" a la salida del ciclón a ¼" de la tubería de las trampas, lo cual aumentaba la caída de presión.

La estrategia de solución propuesta fue la modificación en el diseño inicial para la salida de gases después del ciclón, derivando una parte del flujo hacía el sistema de muestreo a una tasa de 0,7 a 1,2 L/min manteniendo el montaje actual de tubing de acero inoxidable de ¼", e instalar otra serie hacia un nuevo sistema de trampas de limpieza, el cual consta de 4 botellas adaptadas como trampas y una tubería de ¾" fabricada en PVC, teniendo en cuenta los altos costos que implicaría modificar el gasificador al realizar el nuevo sistema de derivación en acero inoxidable.

4.2.2. Pruebas Preliminares

Para la evaluación del equipo se realizaron 3 pruebas preliminares con el objetivo de estandarizar el proceso, poner en marcha la unidad y conseguir la temperatura del reactor esperada, entre 600 a 700°C. El desarrollo de las pruebas se realizó utilizando cáscara de cacao con un contenido de humedad de equilibrio, un tamaño de partícula entre 4,75 a 9,45 mm y un ER de 0,22, verificando el correcto funcionamiento del equipo y así dar inicio a la evaluación del equipo en función del ER.

4.3. Evaluación de la Influencia de la ER en los Productos de Gasificación

A partir de las condiciones de operación establecidas, se estudiaron 3 niveles de la variable ER, teniendo en cuenta el rango de valores donde se encuentra el valor óptimo (ER entre 0,2 – 0,4) (Radenahmad et al., 2020) con el fin de evaluar el funcionamiento del gasificador.

Según el comportamiento del proceso en cuanto al tiempo total de funcionamiento, se tiene que, a medida que ER disminuye (ER entre 0,29 a 0,15), el tiempo total de funcionamiento varía entre los 95 a 180 minutos respectivamente, de manera que se debe establecer criterios para delimitar la zona donde se dan las mejores condiciones para la gasificación, para que, según estos resultados, se realice el análisis del proceso. Dichos criterios se indican a continuación:

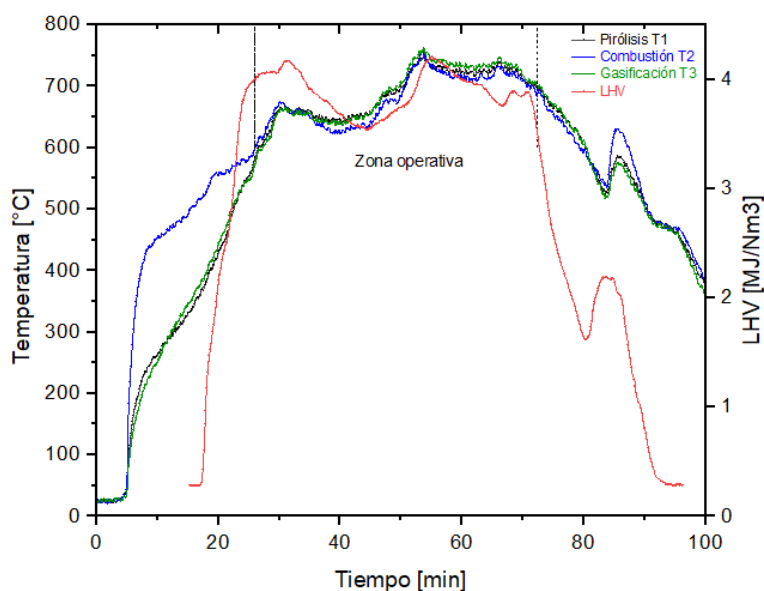
- Una temperatura en la zona de reducción superior a 500°C, la cual da inicio a la gasificación del char con H₂O y CO₂ (Badeau & Levi, 2009).
- Estabilidad del poder calorífico con respecto al tiempo (Aydin et al., 2018).
- Un LHV superior a 3 MJ/Nm³, lo cual lo limita para caracterizarlo como un gas pobre al utilizar aire como agente gasificante (Bhaskar et al., 2013)

4.3.1. Perfil de Temperatura

En la figura 6 se observa la variación de temperatura en las 3 zonas del reactor y el respectivo comportamiento del poder calorífico inferior (LHV) del syngas obtenido a lo largo de la reacción. En este caso se muestra el comportamiento para el mayor valor de ER, igual a 0,29.

Figura 6.

Variación de temperatura del reactor y LHV del syngas obtenido durante la Gasificación utilizando $ER=0,29$.



Como puede observarse, al iniciar la ignición del equipo, la temperatura del gas aumenta de manera exponencial debido a la liberación del material volátil de la biomasa, predominando las reacciones de oxidación quienes son exotérmicas.

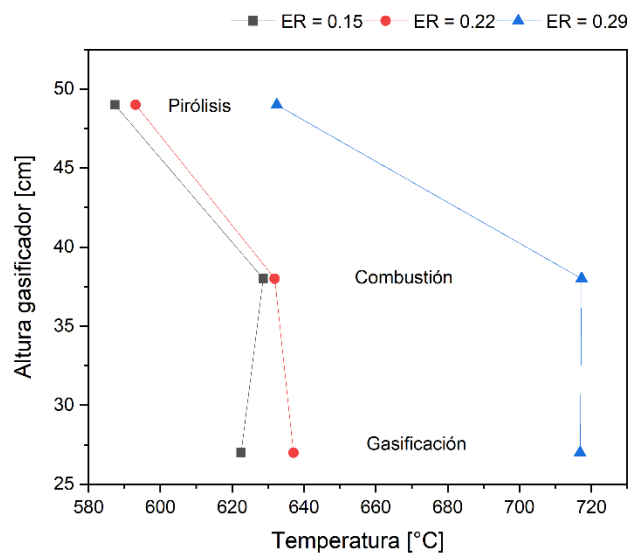
Una vez que se consumen los compuestos volátiles, la temperatura del gas deja de aumentar y tiende a ser constante; es aquí donde prevalecen las reacciones de reducción, las cuales aprovechan la energía disponible y predominan durante cierto intervalo de tiempo, hasta llegar a un punto donde empieza a disminuir su tasa de producción, y se reduce el calor generado en las reacciones exotérmicas, por lo que empieza un enfriamiento convectivo del gas, generando la

inhibición del avance del frente de llama hasta el momento de terminar con el proceso (Pérez, 2007).

En la figura 7 se puede observar la temperatura promedio de las tres zonas: pirólisis, combustión y gasificación (en orden de arriba hacia abajo) para cada valor de ER estudiado.

Figura 7.

Efecto de la ER sobre el perfil de temperatura en las tres zonas del reactor



Como puede observarse, la temperatura en las tres zonas aumenta a medida que se incrementa el valor de ER, debido a que se alimenta una mayor cantidad de oxígeno disponible para reaccionar con la biomasa, lo que aumenta la proporción de las reacciones de oxidación, las cuales son exotérmicas, provocando así un aumento en la temperatura del proceso.

El perfil de temperatura obtenido es similar al reportado en literatura donde su valor más alto corresponde a la zona de combustión, seguido de gasificación y pirólisis (Lesme-Jaen et al., 2011). Cabe destacar la variación de temperatura obtenida para cada valor de ER estudiado, teniendo que para valores bajos de ER igual a 0,15 y 0,22, su efecto sobre la temperatura no es tan significativo comparado con el valor más alto de ER igual a 0,29, por lo que se puede deducir que

para valores de ER entre 0,15 y 0,22, la cantidad de oxígeno alimentado no es suficiente para promover las reacciones de oxidación exotérmicas del H₂ y CO (Ec.5 y Ec.6).

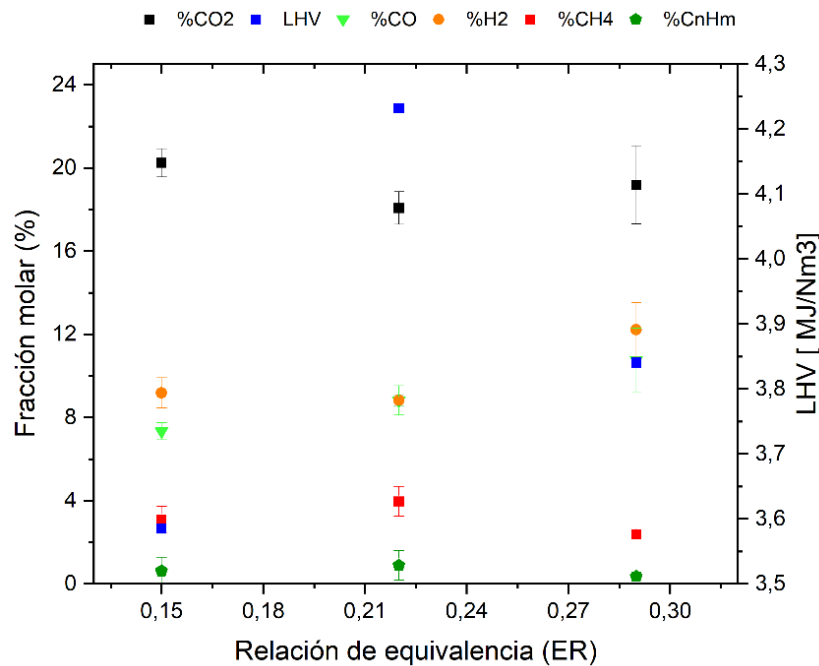
4.3.2. Efecto de la ER sobre la Composición del Syngas

Las fracciones molares en base seca del syngas para H₂, CO, CO₂, CH₄, C_nH_m, se muestran en la figura 8, incluyendo también su poder calorífico inferior (LHV), el cual es calculado directamente por el analizador de gases mediante la siguiente expresión:

$$LHV_{syngas} \left[\frac{MJ}{Nm^3} \right] = 10,777 * y_{H_2} + 12,630 * y_{CO} + 35,818 * y_{CH_4} + 91,180 * y_{C_nH_m} \quad (Ec. 15)$$

Figura 8.

Efecto de la ER sobre la Composición del Syngas y poder Calorífico (LHV).



Se observa que a medida que aumenta la ER, la fracción molar de H₂ y CO aumentan de 9,19 a 12,22% y de 7,34 a 10,76%, respectivamente, debido a que existe una mayor cantidad de oxígeno, lo cual genera una mayor liberación de energía, favoreciendo las reacciones endotérmicas

como la reacción de Boudouard, carbonizado-vapor de agua y reformado de metano, donde se generan H_2 y CO .

También se observa que la fracción molar del CH_4 y C_nH_m , poseen una tendencia similar, presentando el valor más alto para un ER igual a 0,22. Por otro lado para el mayor valor de ER igual a 0,29 (donde se obtienen mayores temperaturas), el contenido de CH_4 y C_nH_m en el syngas es menor, debido a que la reacción de generación de estos compuestos como la hidrogasificación es una reacción exotérmica, por lo tanto, una mayor temperatura dificulta su producción.

Del mismo modo, para el poder calorífico del syngas se tiene una tendencia similar donde para el valor de ER igual a 0,22, se obtuvo el LHV más alto, igual a $4,23 \text{ MJ}/Nm^3$, lo cual es coherente con la mayor presencia de CH_4 y C_nH_m quienes influyen en mayor proporción debido a que su poder calorífico es mucho mayor al de H_2 y al de CO .

Por otro lado, el CO_2 presenta un comportamiento interesante puesto que su tendencia es diferente a la de los anteriormente mencionados, donde para el ER intermedio igual a 0,22 presenta el menor valor, lo cual se le atribuye a la participación de este como producto intermedio en la reacción con el carbono aun presente en la fase sólida para la generación de monóxido de carbono (Reacción de Boudouard) (Awais et al., 2021).

4.3.3. Balance de Masa del Proceso de Gasificación

Siguiendo la metodología para determinar la cantidad de biochar, cenizas, alquitrán y vapor que contiene el gas, mediante los balances indicados en el Apéndice F, se determinan los datos de rendimiento, conversión y eficiencia. De esta manera, en la tabla 2 se sintetizan los resultados del balance de masa para cada valor de ER propuesto.

Tabla 2.

Evaluación del Rendimiento del Proceso con Respecto a la ER

ER	0,15	0,22	0,29
Flujo syngas [g/min]	24,79 ± 0,62	37,25 ± 0,48	47,07 ± 4,65
Alquitrán [g/m ³]	3,25 ± 1,84	8,61 ± 2,26	14,53 ± 6,59
H ₂ /CO	1,26 ± 0,02	1,01 ± 0,04	1,16 ± 0,01
CGE (%)	24,94 ± 2,65	25,42 ± 2,67	31,28 ± 3,79
LHV _{prom} [MJ/Nm ³]	3,58 ± 0,38	4,23 ± 0,31	3,84 ± 0,05
Tiempo zona operación constante [min]	79,33 ± 2,47	45 ± 0,47	43,7 ± 3,83

Según los resultados del rendimiento del proceso de gasificación, se determina que el mayor flujo de syngas se obtiene para el mayor valor de ER, y viceversa, debido a la diferencia que existe en el tiempo de la zona de operación, ya que, a mayor cantidad de oxígeno alimentado, la oxidación se ve favorecida y la biomasa se consume más rápido, por lo tanto, el tiempo de operación o gasificación es menor.

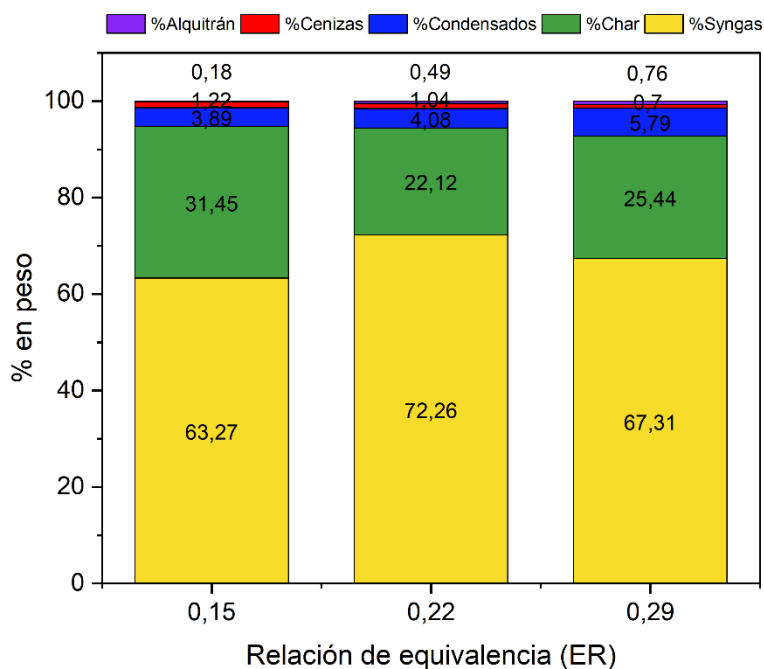
Para la eficiencia del gas en frío (CGE), el mejor resultado (31%) se obtiene para la mayor ER, lo que se le atribuye al poder calorífico y al mayor flujo de syngas, quien aumenta debido al mayor caudal de aire alimentado y al corto tiempo de operación.

Sin embargo, considerando el objetivo general al que está asociado el presente trabajo, donde se busca tener la mejor relación H₂/CO para ser utilizado en celdas de combustible, la mayor relación de H₂/CO (1,26) se obtiene cuando se utiliza la ER más baja, igual a 0,15, al mismo tiempo; permitiendo operar en la zona de reacción durante más tiempo.

En cuanto al rendimiento de cada uno de los productos obtenidos en el proceso, los resultados se muestran en la figura 9.

Figura 9.

Resultados del Rendimiento de los Productos de Gasificación con Respecto a la Variación en la ER.



Considerando que, durante la gasificación, el objetivo principal es la conversión de la biomasa a syngas, en este estudio se tiene que para el valor de ER igual a 0,22, existe un mejor aprovechamiento energético de la biomasa, lo que se ve reflejado en un mayor rendimiento del syngas igual a 73,2 %, y un rendimiento más bajo de char, igual al 22 %. El caso contrario ocurre para la ER más baja, donde se tiene un menor rendimiento de syngas y mayor rendimiento de biochar, a causa de la lenta oxidación por el bajo suministro de oxígeno y al consumo no uniforme en la zona sobre la garganta del gasificador.

4.3.4. Caracterización de Subproductos de la Gasificación

Con el fin de evaluar el potencial energético de los subproductos generados, se realizó su respectiva caracterización. Los resultados para el biochar se muestran en la tabla 3.

4.3.4.1 Caracterización del Biochar

Tabla 3.

Resultados del análisis próximo y el poder calorífico del biochar

Análisis próximo (% en peso y en base húmeda)			
% Humedad	% Volátiles	% Carbono Fijo	% Cenizas
9,72	44,45	40,77	5,04
Poder calorífico HHV [MJ/kg]			
ER	0,15	0,22	0,29
HHV [MJ/kg]	22,0648	22,7804	21,6568

Según el análisis próximo realizado al biochar obtenido durante la gasificación, se observa que utilizando una ER igual a 0,22, se obtiene un carbón con mayor un poder calorífico con respecto al valor inicial de la biomasa, pasando de 15,5095 MJ/kg a 22,0648 MJ/kg. Esto se debe a que cuando la biomasa se gasifica, pasa por un proceso de torrefacción, donde existe inicialmente una reducción del material volátil, por lo que incrementa su carbono fijo, quien es la base para las reacciones de oxidación.

4.3.4.2 Caracterización del Alquitrán. En la tabla 4 se observan los resultados de la caracterización del alquitrán obtenido durante la gasificación para los valores de ER estudiados.

Tabla 4.

Propiedades Fisicoquímicas del Alquitrán

ER	0,15	0,22	0,29
Densidad [g/mL]	1,094 ±0,001	1,132 ±0,051	1,091 ±0,002
pH	5,73±0,09	5,88±0,19	6,01±0,01
HHV [MJ/kg]	18,400	17,267	20,878

Se evidencia que, para el rango de valores de ER estudiados, se tiene un bajo efecto sobre las propiedades del alquitrán ya que no existe una variación significativa. El alquitrán que se genera durante la gasificación depende de las condiciones de reacción, teniendo en cuenta que la temperatura de operación se encuentra alrededor de 650°C, se considera que la composición del alquitrán corresponde principalmente a alquitranes primarios (alcoholes, ácido carbónico, cetona, aldehídos) los cuales se producen durante la etapa de pirólisis entre 200-500°C y alquitranes secundarios (piridina, furano, dioxina y tiofeno) que se generan en la etapa de oxidación debido al incremento de la temperatura entre 500-1000°C (Molino et al., 2016).

La densidad obtenida es superior a la de otros biocombustibles líquidos como el diésel (el cual está entre 0,84 y 0,85 g/mL), debido a los hidrocarburos pesados presentes en el alquitrán, donde sus cadenas carbonadas pueden romperse si se trabajara a mayores temperaturas (Calderón & Torres, 2012). Según los resultados de pH, el alquitrán tiene un carácter levemente ácido, lo cual varía con lo reportado en literatura donde obtienen valores menores (pH entre 2 y 3) (Calderón & Torres, 2012). Lo mismo se observa para el poder calorífico, el cual es inferior comparado con el obtenido por Tarazona (2013), lo cual se atribuye a las condiciones de operación y al funcionamiento del equipo, así como a la separación de trazas de solvente y agua inmersas en el alquitrán debido a su baja eficiencia durante la separación en las trampas.

5. Conclusiones

Durante la puesta en marcha de la unidad se logró obtener el perfil de temperatura y composición del syngas esperados, así como también establecer el protocolo de operación y seguridad para su correcto funcionamiento.

Según las condiciones de operación establecidas, la variable ER presenta un efecto significativo sobre el rendimiento del proceso, donde para valores de ER igual a 0,22 y 0,29, se produce un syngas con mayor poder calorífico, sin embargo, su tiempo de operación es corto, lo cual se desea incrementar para obtener una mayor ventana operativa.

Por otro lado, para el valor más bajo de ER igual a 0,15, se obtiene cerca del doble de tiempo de operación con una mejor relación H_2/CO , haciendo que este syngas sea más adecuado para su uso en celdas de combustible.

Cabe resaltar el efecto de utilizar aire como agente gasificante, ya que, a pesar de ser un agente de bajo costo, este afecta a la calidad del syngas debido a su alta composición de nitrógeno (alrededor del 50% en fracción molar), lo que en términos de poder calorífico genera un syngas de baja calidad ($4-6 \text{ MJ}/Nm^3$). Sin embargo, según otros requerimientos aún puede ser utilizado en motores de combustión interna para la generación de electricidad, y en calderas para la generación de calor.

Según los resultados obtenidos en el presente trabajo, en cuanto al funcionamiento y rendimiento del proceso, la cáscara de cacao muestra un gran potencial para ser utilizada como biocombustible sólido en procesos de gasificación, generando así un menor impacto ambiental y contribuyendo a la transición energética.

6. Recomendaciones

Según lo observado sobre el consumo de biomasa, se recomienda controlar la agitación de la rejilla, ya que esto puede tener un efecto significativo, en aras de tener un consumo constante y uniforme, para así lograr un incremento en el tiempo de operación. Además, se sugiere analizar el diámetro de abertura de las boquillas de entrada de aire y su ángulo de posición con respecto al eje radial, ya que puede tener un impacto sobre la distribución del oxígeno por el área transversal del equipo, esto con el fin de lograr una distribución uniforme por los espacios vacíos del lecho y evitar efectos de canalización.

Se recomienda instalar un medidor de flujo a la salida del syngas, con el objetivo de llevar un control de la variación del mismo a lo largo de la reacción, y así poder analizar y obtener una estimación de la variación del consumo de la biomasa, logrando una mayor comprensión del comportamiento de este tipo de reactores por lotes.

Se recomienda realizar una limpieza periódica a la unidad piloto, ya que la deposición de compuestos como el alquitrán en las paredes de los equipos, tuberías y accesorios, pueden generar erosión en las mismas y obstrucción en el paso del syngas, ocasionando un efecto en el desempeño del mismo y una mayor caída de presión, lo que puede ser peligroso debido a la presurización interna del equipo.

Referencias Bibliográficas

- Anukam, A.; Mamphweli, S.; Reddy, P.; Meyer, E.; Okoh, O. Pre-processing of sugarcane bagasse for gasification in a downdraft biomass gasifier system: A comprehensive review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, 66, 775–801
- Awais, M., Li, W., Munir, A., Omar, M. M., & Ajmal, M. (2021). Experimental investigation of downdraft biomass gasifier fed by sugarcane bagasse and coconut shells. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11(2), 429–444. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00690-5>
- Aydin, E. S., Yucel, O., & Sadikoglu, H. (2018). Numerical and experimental investigation of hydrogen-rich syngas production via biomass gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(2), 1105–1115. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.11.013>
- Badeau, Jean-Pierre, and Albrecht Levi. Biomass Gasification : Chemistry, Processes and Applications, Nova Science Publishers, Incorporated, 2009. ProQuest Ebook Central, <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliouis-ebooks/detail.action?docID=3018715>.
- Basu, P. (2018). Design of biomass gasifiers. In *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory* (Third Edit). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812992-0.00008-X>
- Bhaskar, T., Balagurumurthy, B., Singh, R., & Poddar, M. K. (2013). Thermochemical Route for Biohydrogen Production. *Biohydrogen*, 8, 285–316. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59555-3.00012-X>
- Calderón, M., Torres, A., (2012). *Diseño y puesta en marcha del montaje de una planta piloto a escala laboratorio para producción de bio-oil a partir de biomasa mediante pirólisis*. [tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander]

- De, S., Agarwal, A. K., Moholkar, V. S., & Thallada, B. (2018). *Coal and Biomass Gasification* (Issue January). https://www.amazon.com/Coal-Biomass-Gasification-Environment-Sustainability/dp/9811073341/ref=sr_1_2?ie=UTF8&qid=1513681191&sr=8-2&keywords=Coal+and+Biomass+Gasification%0Ahttp://link.springer.com/10.1007/978-981-10-7335-9
- FAO. (2009). CACAO: Operaciones Poscosecha. *Organizacion de Las Naciones Unidas Para La Alimentacion y La Agricultura*, 1–78. <http://www.fao.org/3/a-au995s.pdf>
- Fernández, L. E. G. (2011). Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo. *Universidad Nacional de Colombia*, 112.
- Gasification Theory and Modeling of Gasifiers. (2010). In *Biomass Gasification and Pyrolysis* (First Edit). © 2010 Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374988-8.00005-2>
- González, L. M. R. (2019). *Aprovechamiento de la cáscara de cacao para la elaboración de un biocomposito con aplicación en la construcción sostenible*. 53(9), 1689–1699.
- Gunasekaran, A. P., Chockalingam, M. P., Padmavathy, S. R., & Santhappan, J. S. (2021). Numerical and experimental investigation on the thermochemical gasification potential of Cocoa pod husk (*Theobroma Cacao*) in an open-core gasifier. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23(5), 1603–1615. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02051-w>
- Havilah, P. R., Sharma, A. K., Govindasamy, G., Matsakas, L., & Patel, A. (2022). Biomass Gasification in Downdraft Gasifiers: A Technical Review on Production, Up-Gradation and Application of Synthesis Gas. *Energies*, 15(11), 3938. <https://doi.org/10.3390/en15113938>
- IEA Bioenergy. (2020). *Emerging Gasification Technologies for Waste & Biomass* (Issue December). <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/new-publication-emerging->

gasification-technologies-for-waste-biomass/

- Jahromi, R., Rezaei, M., Hashem Samadi, S., & Jahromi, H. (2021). Biomass gasification in a downdraft fixed-bed gasifier: Optimization of operating conditions. *Chemical Engineering Science*, 231, 116249. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.116249>
- Lesme, R., Silva, E., Vieira, R., & Martinez, J. (2011). EVALUACIÓN TEÓRICO EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA AVANZADO GASIFICADOR DE BIOMASA / MOTOR RECIPROCANTE PARA LA GENERACIÓN DE Introducción Desarrollo Parámetros operacionales. *Tecnología Química*, XXXI(3), 23–30
- Maitlo, G., Ali, I., Mangi, K. H., Ali, S., Maitlo, H. A., Unar, I. N., & Pirzada, A. M. (2022). Thermochemical Conversion of Biomass for Syngas Production: Current Status and Future Trends. *Sustainability (Switzerland)*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/su14052596>
- Martínez, J. D., Villamizar, R. A., & Ortiz, O. O. (2015). Pod Husk As a Renewable Energy Source. *Agrociencia*, 49, 329–345.
- Ministerio de Minas y Energía, C., & Banco interamericano de Desarrollo, B. (2021). *Transición energética: un legado para el presente y el futuro de Colombia Iván Duque Márquez Presidente de la República*. 128. www.laimprentaeditores.com
- Molino, A., Chianese, S., & Musmarra, D. (2016). Biomass gasification technology : The state of the art overview. *Journal of Energy Chemistry*, 25(1), 10–25. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2015.11.005>
- Muthu Dinesh Kumar, R., & Anand, R. (2019). Production of biofuel from biomass downdraft gasification and its applications. In *Advanced Biofuels: Applications, Technologies and Environmental Sustainability*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102791-2.00005-2>

- Narnaware, S. L., & Panwar, N. L. (2022). Biomass gasification for climate change mitigation and policy framework in India: A review. *Bioresource Technology Reports*, 17. <https://doi.org/10.1016/J.BITEB.2021.100892>
- Oficina de comunicaciones - FEDECACAO. (11 de Febrero de 2022). *La producción cacaotera nacional sigue creciendo: en 2021 logra un nuevo récord histórico*. Federación Nacional de Cacaoteros. Recuperado del sitio web. <https://www.fedecacao.com.co/post/la-producción-cacaotera-nacional-sigue-creciendo-en-2021-logra-un-nuevo-récord-histórico>
- Pérez, J. F. (2007). *Modelado unidimensional del proceso de gasificación de biomasa lignocelulósica en lechos empacados en equicorriente*.
- Pérez, J. F., Melgar, A., & Benjumea, P. N. (2012). Effect of operating and design parameters on the gasification/combustion process of waste biomass in fixed bed downdraft reactors: An experimental study. *Fuel*, 96, 487–496. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.01.064>
- Pérez, J., Borge, D., & Agudelo, J. (2010). Proceso de gasificación de biomasa: una revisión de estudios teórico -experimentales. *Revista Facultad de Ingeniería*, 52, 95–107.
- Radenahmad, N., Azad, A. T., Saghir, M., Taweeekun, J., Bakar, M. S. A., Reza, M. S., & Azad, A. K. (2020). A review on biomass derived syngas for SOFC based combined heat and power application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119(November 2019), 109560. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109560>
- Rueda-ordóñez, Y., & Tannous, K. (2017). *aplicando un esquema de reacciones paralelas independientes Kinetic analysis of biomass thermal decomposition applying a scheme of independent parallel reactions*. 16(2), 119–127.
- Ruiz, J. A., Juárez, M. C., Morales, M. P., Muñoz, P., & Mendívil, M. A. (2013). Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers. *Renewable*

- and Sustainable Energy Reviews*, 18, 174–183. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.021>
- Schildhauer, T. J., & Biollaz, S. M. A. (2016). *Synthetic Natural Gas from Coal, Dry Biomass, and POWER-TO-GAS Applications*. 41–76.
- Shahabuddin, M., & Alam, T. (2022). Gasification of Solid Fuels (Coal, Biomass and MSW): Overview, Challenges and Mitigation Strategies. *Energies*, 15(12), 4444. <https://doi.org/10.3390/en15124444>
- Tarazona. S. (2013). *Optimización del proceso de producción de bio oil a partir de raquis de palma de aceite por pirólisis intermedia*. [tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander]
- UPME. (2005). *Atlas del Potencial Eenergético de la Biomasa Residual en Colombia*.
- Van de Kamp, W., De Wild, P., Zielke, U., Suomalainen, M., Knoef, H., Good, J., Liliedahl, T., Unger, C., Whitehouse, M., Neeft, J., van den Hoek, H., & Kiel, J. (2005). Tar measurement standard for sampling and analysis of tars and particles in biomass gasification product gas. *Proceedings of the 14th European Biomass Conference and Exhibition, 20002*, 791–794.
- Vásquez, Z. S., de Carvalho Neto, D. P., Pereira, G. V. M., Vandenberghe, L. P. S., de Oliveira, P. Z., Tiburcio, P. B., Rogez, H. L. G., Góes Neto, A., & Soccol, C. R. (2019). Biotechnological approaches for cocoa waste management: A review. *Waste Management*, 90, 72–83. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.030>
- Woolcock, P. J., & Brown, R. C. (2013). A review of cleaning technologies for biomass-derived syngas. *Biomass and Bioenergy*, 52, 54–84. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.02.036>
- Zhang, Y., Wan, L., Guan, J., Xiong, Q., Zhang, S., & Jin, X. (2020). *A Review on Biomass Gasi*

fi cation : E ff ect of Main Parameters on Char Generation and Reaction

Apéndices

Apéndice A. Protocolo de funcionamiento del gasificador

La unidad piloto de gasificación tiene como objetivo la valorización de un componente sólido con propiedades fisicoquímicas conocidas mediante un proceso de conversión termoquímico, con el objetivo de generar un gas de síntesis que pueda ser utilizado para su aprovechamiento energético. A continuación, se mostrarán los respectivos equipos y accesorios, así como el protocolo de operación de cada uno de ellos para su correcto funcionamiento.

Equipos y accesorios: En la figura 16 y 17, se observa que el sistema consta del gasificador (1), lector de datos termocupla (2), rotámetro (3), higrómetro (4), trampas de condensación del sistema de derivación (5), trampas de condensación sistema de muestreo (6), analizador de gases (7), sonda de humedad (8), ciclón (9), los cuales se encuentran ubicados en la sede Guatiguará – Laboratorio INTERFASE – 305.

Figura A1.

Vista Frontal Montaje Unidad Piloto de Gasificación

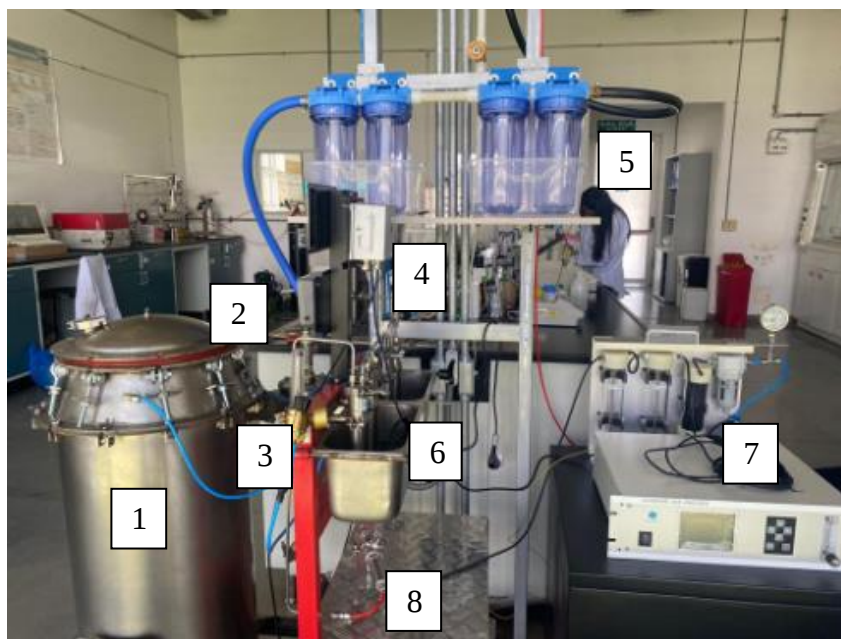


Figura A2.

Vista Lateral Montaje Unidad Piloto de Gasificación



A continuación, se describirá en detalle el protocolo de funcionamiento de los equipos.

Acciones preliminares al encendido del equipo**Gasificador: tipo Downdraft de 10kWth**

Los experimentos se llevarán a cabo en un gasificador tipo downdraft. La longitud y el diámetro externo del gasificador son 65 cm y 38 cm, respectivamente. El gasificador es el equipo principal de la unidad donde ocurren las reacciones necesarias para la producción de syngas.

Figura A3.

Gasificador Downdraft



1. Revisar que las líneas de entrada y salida de gases del montaje se encuentren correctamente ubicadas y ajustadas.
2. Desajustar los tornillos de las zonas de carga y de acumulación de cenizas para verificar que se encuentren vacías y limpias.
3. Revisar que el tubo de ignición y las boquillas de entrada de aire al gasificador, se encuentren limpias y sin obstrucción alguna.
4. Desajustar abrazadera de la salida de fondos del ciclón y verificar que se encuentre limpio y vacío, posteriormente, ajustar tapa y cerrar bien.
5. Revisar que el filtro se encuentre bien ajustado y limpiarlo periódicamente.
6. Ajustar el soporte de la termocupla con el fin de que quede centrada.
7. Verificar que la rejilla para las cenizas se encuentre ajustada.
8. Cargar el equipo con la biomasa necesaria desde la zona superior del mismo.
9. Verificar que la termocupla esté limpia y bien ajustada a la tapa del gasificador.

10. Colocar cuidadosamente la termocupla en su soporte, posteriormente, cerrar y asegurar la tapa y la zona de acumulación de cenizas.

11. Abrir válvula de paso de aire, y mediante un tiempo corto de estanqueidad verificar alguna fuga de gas en el equipo y corregirla.

Termocupla:

La termocupla se encuentra soportada en la estructura del equipo y consta de un adaptador, baterías, tarjeta SD. Es importante verificar que el nivel de la batería no esté por debajo de determinado rango, ya que puede causar problemas con la lectura de los datos. Cuando se utilice por tiempos prolongados es recomendable conectar el display con el adaptador.

Figura A4.

Termocupla y Lector de Datos 4 Channel K Thermometer SD Looger



12. Verificar que los cables y conectores se encuentren en excelente estado.

13. Previo al cierre de la tapa superior del gasificador en la fase de carga, verificar que se encuentre en la posición correcta y bien ajustada.

14. Conectar los tres cables a sus puertos respectivos del lector de temperaturas

15. Verificar que la tarjeta SD en la cual se almacenarán los datos se encuentre en el medidor.

16. Conectar el cable del equipo a una fuente de 110 V y encenderlo. (Nota: Verificar que estén correctos los datos de fecha y hora del lector de datos).

17. Verificar que los datos de temperatura de los tres puntos de medición sean coherentes (Deben oscilar entre 20 a 30°C).

Trampas de condensación y derivación:

Figura A5.

Trampas de Condensación Sistema de Derivación



Figura A6.

Trampas de Condensación Sistema de Muestreo



1. Verificar que los recipientes para las trampas y las botellas impigner se encuentren vacíos y limpios.
2. Verificar que las líneas de flujo se encuentren ajustadas y en su posición correcta.
3. Llenar las botellas impigner del sistema de muestreo y del sistema de derivación identificadas como 2, 3 y 4 con 50 y 140 mL de isopropanol respectivamente.
4. Ajustar las botellas impigner en su respectivo soporte.
5. Para los recipientes de las trampas de muestreo y derivación, en el primero llenar con hielo, agua y sal hasta una altura de 10 y 8 cm respectivamente, en el segundo recipiente llenar con hielo seco e isopropanol hasta una altura de 10 y 8 cm respectivamente.
6. Haciendo uso de un termómetro verificar la temperatura en las trampas con el fin de garantizar que se esté llevando a cabo el enfriamiento gradual del gas de muestra.

Analizador de gases:

Figura A7.

Analizador de Gases Gasboard 3100



1. Revisar que las conexiones de entrada y salida de gas estén instaladas de manera correcta.

2. Verificar que las trampas de condensación se encuentren limpias y sus conexiones de entrada y salida de gas se encuentren bien ajustadas.
3. Revisar que las conexiones de la lectura de datos (Puerto RS232) estén instalados de forma correcta.
4. Retirar el tapón de la entrada de aire ubicado en la parte posterior del equipo.
5. Conectar el cable USB al computador y abrir el programa instalado para la lectura de datos (Gas Analyzer Dataload).
6. Conectar polo a tierra del equipo y conectar el cable de energía a un tomacorriente de 220 V.
7. Encender el equipo y esperar a que el analizador empiece el calentamiento durante 800 segundos (13-14 minutos).
8. Encender la bomba de vacío (flecha hacia arriba del analizador), debe estar encendida durante todo el proceso.
9. Verificar que el orden de la lista de gases que aparecen en el analizador sea el mismo orden que están en el programa de medición.

Higrómetro:**Figura A8.***Higrómetro VAISALA*

1. Verificar que el cable de transmisión de datos de la sonda esté en la posición correcta.
2. Verificar que se encuentren bien ajustados las conexiones de entrada y salida de gas.
3. Revisar que las conexiones de la lectura de datos estén instaladas de forma correcta y tener abierto el programa instalado en el computador para su medición (MI70link), posteriormente cerrar y ajustar la tapa del equipo.
4. Conectar el cable del equipo a una fuente de 110 V.

Protocolo de encendido y funcionamiento de los equipos.

Una vez cumplido y seguido el orden de las acciones preliminares, se procede al protocolo para la puesta en marcha de la unidad.

1. Ajustar y asegurar la manguera de succión de aire en la salida del ciclón.
2. Abrir totalmente la válvula reguladora que da paso a la derivación y cerrar totalmente la válvula que da paso a la línea de muestreo.
3. Encender la cabina de extracción de gases.
4. Conectar el soplador a una fuente de 110 V.

5. Colocar la manguera de salida de gases del soplador hacia el ambiente externo.
6. Iniciar la grabación del lector de datos de la termocupla (Oprimir por 2 segundos el botón de “REC”, después, oprimir por 1 segundo el botón “Max/min”).
7. Ajustar un flujo de entrada de aire al gasificador de 5 L/min.
8. Encender el soplete de butano e introducir la mecha por la abertura de la tapa del gasificador durante 20 segundos, al mismo tiempo, realizar la succión del aire hasta garantizar la ignición del proceso y observar la salida del syngas.
9. Cerrar y asegurar las tapas por donde se realizó la ignición del equipo (cyclón y abertura de la tapa del gasificador)
10. Abrir la válvula del flujo de aire y ajustar el caudal respectivo.
11. Retirar la manguera utilizada en el soplador y junto con él, guardarlos en su lugar respectivo.
12. Cuando la temperatura en la zona de combustión alcance una temperatura de 500°C (10 min aprox.), iniciar la grabación de datos en el analizador de gases. (Mediante el uso del software: GasAnalyzer Dataload), posteriormente, abrir la válvula que da paso a la línea de muestreo y ajustar un flujo de entrada al analizador entre 0,7 a 1,2 L/min.

(Nota: Verificar que la bomba del analizador se encuentre encendida).
13. Una vez transcurrida la reacción, cuando se note una disminución en la temperatura y el valor del LHV medido sea menor a 2 MJ/m³, cerrar la válvula que da paso a la línea de muestreo y cerrar el paso de entrada de aire al equipo (Tiempo aprox. reacción: 60 minutos).

Parada del equipo

1. Detener la grabación de los datos de la termocupla y el analizador de gases.

2. Apagar la bomba de succión del analizador de gases (Sostener 2 segundos flecha hacia abajo analizador).
3. Apagar analizador, posteriormente, desconectar el cable de fuente de poder.
4. Retirar las líneas de entrada y salida al analizador.
5. Colocar el tapón de entrada de aire.
6. Esperar a que los datos de temperatura en la termocupla sean de aproximadamente
7. Posteriormente abrir la tapa superior y la tapa de la rejilla para realizar la descarga del equipo

Limpeza del equipo y cuantificación de alquitrán

Después de realizar las pruebas, las botellas impigner se deben vaciar. La muestra (isopropanol + agua + alquitrán) obtenida en las botellas impigner debe almacenarse en una botella oscura debidamente identificada para realizar su cuantificación. El procedimiento para realizar la evaporación de la solución de alquitrán/ isopropanol consiste en utilizar un rotoevaporador.

Protocolo de funcionamiento

1. Pesar un matraz de 200-250 mL con una precisión de 0,1 mg, posteriormente verter 100 ml de la solución de alquitrán en el matraz y pesar nuevamente para determinar el peso de la solución.
2. Conectar el matraz al rotoevaporador y empezar la evaporación con el baño de agua a una temperatura de 55°C. La presión empezará a descender gradualmente hasta alcanzar los 200mbar.
3. Una vez se haya evaporado todo el solvente, la velocidad de caída de las gotas empezará a disminuir.

4. Detener la agitación del matraz, remover el matraz del baño de agua caliente y secarlo.
5. Dejar el matraz con el alquitrán durante al menos 5 minutos a temperatura ambiente.
6. Posteriormente, pese el matraz con precisión y determine la cantidad de alquitrán obtenido durante el proceso.

Análisis de riesgos y operabilidad

El análisis de riesgos y operabilidad (HAZOP) es un estudio de seguridad que se realiza en equipos o procesos considerando desviaciones como la falta de flujo, temperatura o presión más altas. (Rugby, 2015)

Se realiza la evaluación de los peligros asociados a la unidad piloto de gasificación tipo downdraft. En primer lugar, se analizan los peligros que pueden ser presentados en el sistema de gasificación debido a la generación de gas. El gas producto está compuesto de H_2 , CO y CH_4 gases inflamables y por CO el cual presenta alta toxicidad, provocando factores de riesgos asociados a incendios, explosiones y envenenamiento.

Hoja de trabajo HAZOP

Proyecto: Análisis de riesgos de operabilidad en una unidad de gasificación tipo downdraft utilizando cacota de caco en el laboratorio del grupo de investigación INTERFASE ubicado en el parque tecnológico Guatiguará.

Nodo 1. Gasificador tipo downdraft	Desviación	Causa	Consecuencia	Recomendaciones
1	No flujo	Error operacional en la descarga o succión del compresor de aire.	El compresor no entrega la cantidad de aire necesario para que se lleve a cabo el proceso de combustión en el gasificador.	Verificar el ciclo de trabajo y funcionamiento del compresor antes de ser utilizado.

Hoja de trabajo HAZOP

Proyecto: Análisis de riesgos de operabilidad en una unidad de gasificación tipo downdraft utilizando cacota de caco en el laboratorio del grupo de investigación INTERFASE ubicado en el parque tecnológico Guatiguará.

Nodo 1. Gasificador tipo downdraft	Desviación	Causa	Consecuencia	Recomendaciones
1	No flujo	Error operacional al dejar cerrada la válvula de descargue.	No es posible realizar la puesta en marcha del equipo.	Regular la apertura de la válvula.
1	Bajo flujo	Obstrucción parcial de la línea de comunicación entre el compresor y el gasificador		Realizar inspección periódica de las líneas, con el fin de verificar que no se presente obstrucción o taponamiento.
1	Alto flujo	Mayor flujo de aire al gasificador	Presurización del sistema. Fuga de gas tóxico	
1	Baja presión	Baja presión dentro del gasificador ocasionada por una disminución del flujo de aire debido a falla en el compresor.		Identificar el tipo de falla en el compresor.
1	Baja presión	Error operacional al no regular de forma gradual la apertura de la válvula.		Seguir los protocolos de operación y funcionamiento de los equipos.
1	Alta presión	Alta presión dentro del gasificador debido a que la válvula de globo hacía el sistema de derivación se encuentra cerrada	Escape del gas de síntesis a la atmósfera, el cual es tóxico y puede generar problemas de salud.	Abrir válvula de alivio de presión. Instalar detectores de gas debido a la presencia de gases tóxico e inflamables con el fin de promover la seguridad de la planta y el personal.

Hoja de trabajo HAZOP

Proyecto: Análisis de riesgos de operabilidad en una unidad de gasificación tipo downdraft utilizando cacota de caco en el laboratorio del grupo de investigación INTERFASE ubicado en el parque tecnológico Guatiguará.

Nodo 1. Gasificador tipo downdraft	Desviación	Causa	Consecuencia	Recomendaciones
1	Baja temperatura	El proceso de ignición del equipo no se realizó de manera adecuada siguiendo los protocolos de operación.	Condensación de alquitrán en el equipo, provocando problemas de taponamiento y ensuciamiento	Realizar la agitación en la zona de la rejilla de manera continua durante el tiempo de operación.
1	Alta temperatura		Polimerización del alquitrán debido a las altas temperaturas.	

Apéndice B. Curvas de secado de la biomasa

El proceso de secado se realizó en el deshidratador modelo DY-110 H. Para ello se ingresó la biomasa previamente triturada al horno a una temperatura de 65°C durante 34 hrs, se registró el valor de la masa inicial de cada bandeja cargada y cada 2 horas se retiraban, pesaban y registraban los datos de las bandejas. Se realizó el mismo procedimiento hasta que la masa de la bandeja tenga tres valores constantes. Esto se realizó con el fin de controlar el contenido de humedad que se estableció inicialmente para el desarrollo de las pruebas. En la figura 13, 14 y 15 se presentan las curvas de secado de las bandejas ubicadas en el parte superior, intermedio e inferior, respectivamente.

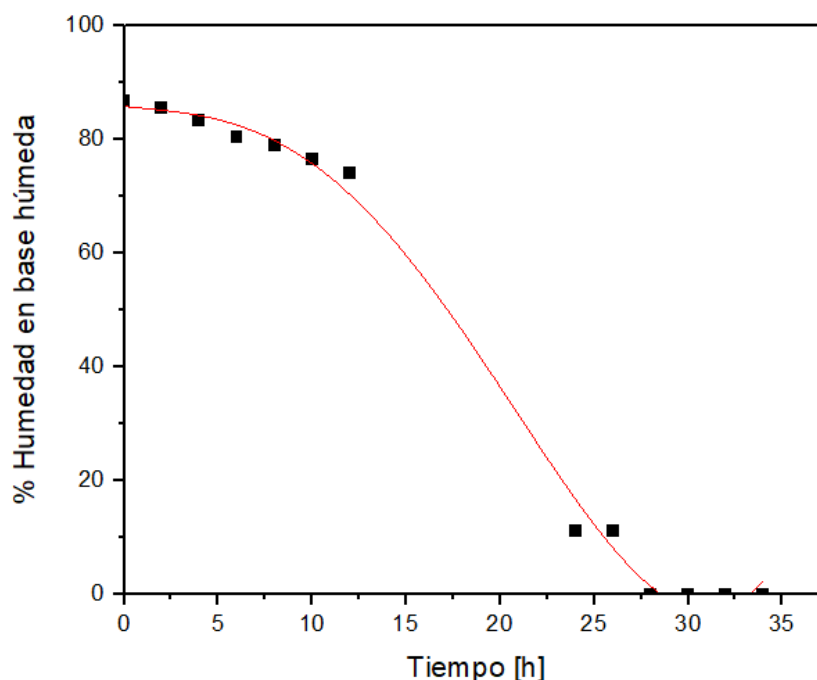
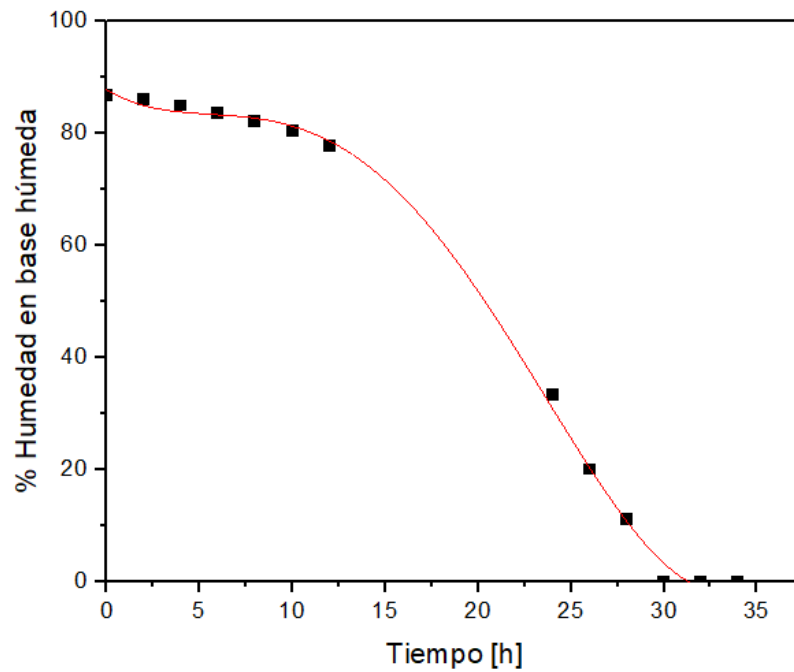
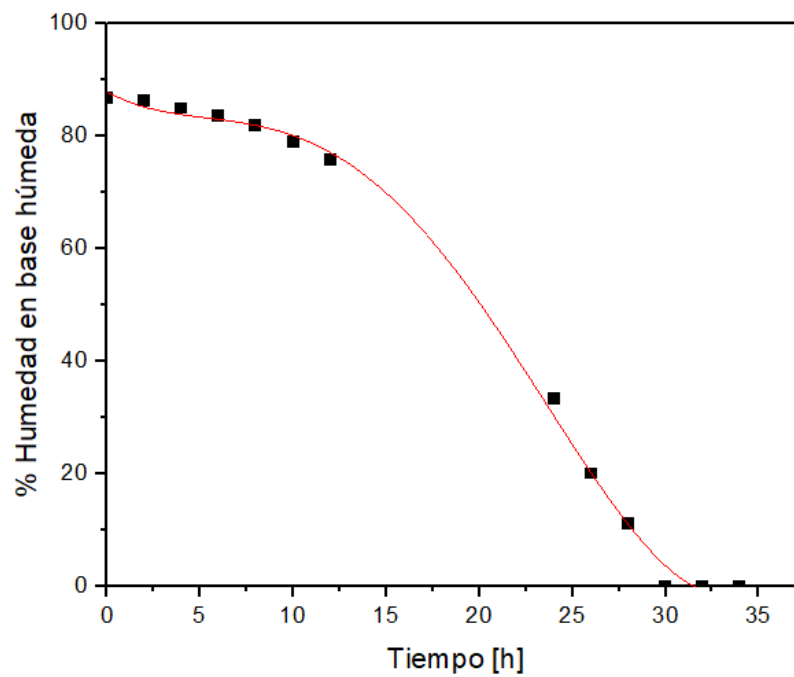
Figura B1.*Curva de Secado Bandeja 1*

Figura B2.*Curva de Secado Bandeja 6***Figura B3.***Curva de Secado Bandeja 10*

Apéndice C. Cálculo de la fórmula molecular de la biomasa

La fórmula molecular de la biomasa es definida como $CH_xO_yN_z$, donde x, y, y z, corresponde al número obteniendo de átomos de Hidrógeno, Oxígeno y Nitrógeno respectivamente. (Moretti et al., 2022). A partir del análisis elemental, se procede a realizar el cálculo de la fórmula molecular de la biomasa.

Composición elemental de la biomasa (%masa)

C = 41,3 % H = 5,9 % N = 0,7% S = 0 % O =52,1 %

A partir de ello, se calcula su composición molar dividiéndolo entre su peso molecular, posteriormente, se normaliza para 1 átomo de carbono, dividiendo el contenido de cada elemento entre el contenido del carbono, de la siguiente manera:

%DAF (seco y libre de cenizas)

- $\%DAF_C = \frac{0,413}{12} = 0,0344$, entonces: $\frac{0,0344}{0,0344}$ $\%DAF_C = 1$
- $\%DAF_H = \frac{0,059}{1} = 0,059$, entonces: $\frac{0,059}{0,0344}$ $\%DAF_H = 1,7143$
- $\%DAF_N = \frac{0,007}{14} = 0,0005$, entonces: $\frac{0,0005}{0,0344}$ $\%DAF_N = 0,0145$
- $\%DAF_O = \frac{0,521}{16} = 0,0326$, entonces: $\frac{0,0326}{0,0344}$ $\%DAF_O = 0,9461$

Obteniendo así los coeficientes para cada uno de los elementos: $C_1H_{1,71}O_{0,95}N_{0,015}$

Apéndice D. Caracterización de la cacota de cacao como materia prima**Análisis elemental**

A continuación, se presenta el informe de resultados del análisis elemental de la cáscara de cacao obtenida por el Laboratorio Instrumental de Análisis Químico de la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander.

Datos generales del análisis elemental realizado a la cacota de cacao.

Análisis y metodología	
Análisis	Determinación del porcentaje de C, H, N y S en muestra
Método	Combustión total
Formato para entrega de resultados	Formato digital en archivo PDF
Condiciones del equipo	
Equipo	Analizador elemento Vario Elcube, Elemental
Temperatura columna de combustión	1150°C
Temperatura columna de reducción	850°C
Flujo de gas de arrastre	230 mL/min
Detector	TCD

Resultados

Muestra: cáscara de cacao seca	C(%)	H(%)	N(%)	S(%)
Código interno:011_ELQ-2022-1				
Valor promedio	41.3	5.9	0.7	0.1*
Deviation (abs.)	0.2	0.0	0.03	0.0
Deviation (rel.) [%]	0.5	0.06	3.9	6.2

*Rango de calibración insuficiente

Nota: Para la cuantificación se consideró que el material suministrado se encontraba totalmente seco. Las muestras no recibieron ningún tipo de pretratamiento.

Análisis próximo

Las figuras 11 y 12 representa los resultados de TGA obtenidos para la cáscara de cacao. La pérdida de masa inicial en 100-107°C corresponde a la eliminación del agua ligada al material. Luego se incrementa la temperatura hasta 960°C con el fin de eliminar el resto de la materia volátil presente en la muestra.

Figura D1.

Curva de TGA de la cacota de cacao húmeda

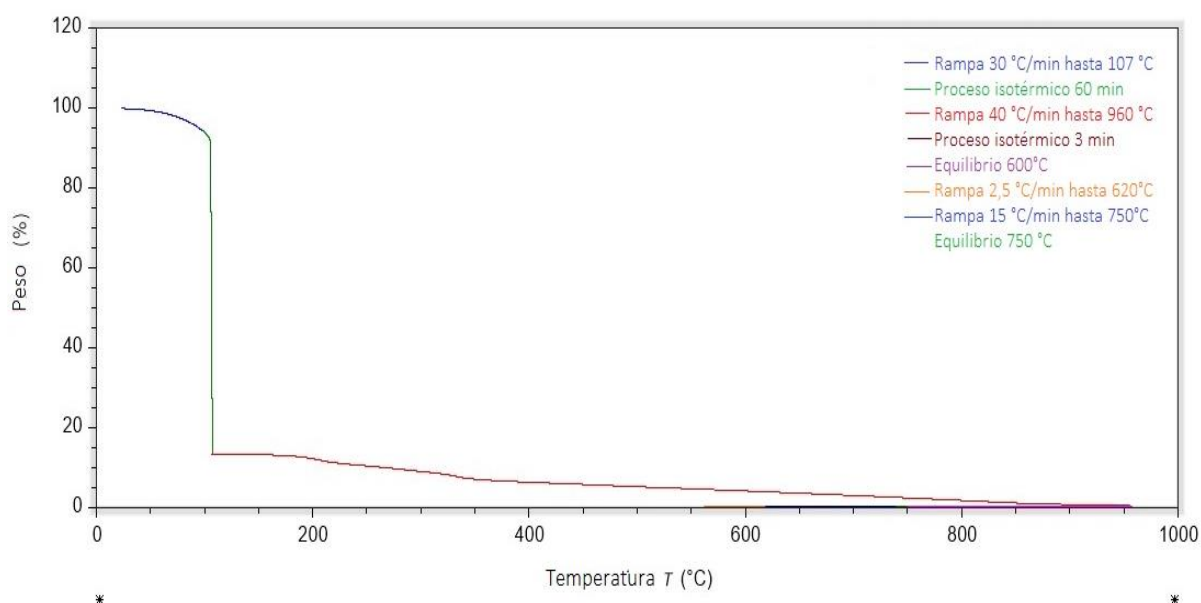
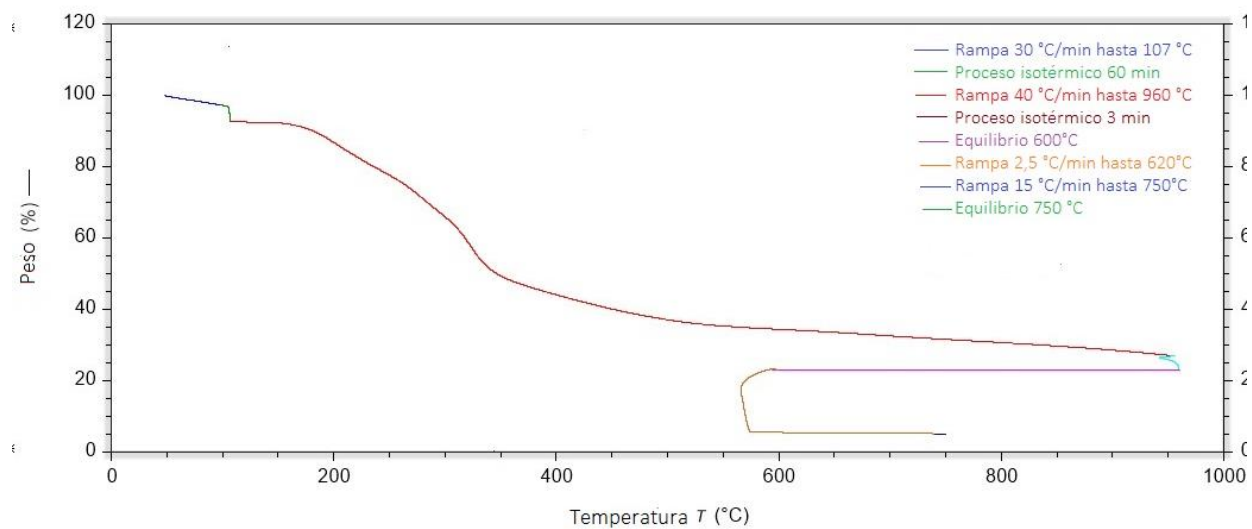


Figura D2.

Curva de TGA de la cacota de cacao seca



Apéndice E. Cálculo de Aire Requerido

Para el cálculo de aire requerido es necesario conocer la composición de la biomasa con la finalidad de calcular el oxígeno teórico para generar la combustión, a partir de ello, teniendo que el valor del ER es la relación entre el oxígeno alimentado y el estequiométrico para 1 kilogramo de biomasa, se obtiene lo siguiente:

$$ER = \frac{O_2 \text{ alimentado}}{O_2 \text{ estequiométrico}} \quad (Ec. 17)$$

Reacciones en oxidación completa:



Obteniendo así, el oxígeno estequiométrico igual a $1 + \frac{\gamma}{4} - \frac{\beta}{2}$, siendo γ y β , los coeficientes de la fórmula molecular del hidrógeno y oxígeno, respectivamente.

Por tanto, a partir de la molecular de la biomasa: $C_1H_{1,71}O_{0,95}N_{0,015}$, se reemplazan los valores respectivos, así:

$$ER = \frac{O_2 \text{ alimentado}}{1 + \frac{1,7143}{4} - \frac{0,9461}{2}} \quad (Ec. 18)$$

Despejando, se tiene:

$$O_2 \text{ alimentado} = ER \times (0,9555)$$

Conociendo el factor estequiométrico, se procede a determinar las moles de biomasa seca que se encuentran en la zona de combustión y reducción, quienes, para el tamaño de partícula seleccionado, a partir del volumen que ocupa la zona y la densidad aparente de la biomasa el cual es igual a $0,2254 \text{ kg/m}^3$, se obtiene una masa igual a 1413 g.

Una vez conocida la cantidad de biomasa, su peso molecular y el contenido de humedad, se procede a calcular las moles de biomasa seca alimentadas al proceso, así:

$$n_{Biomasa\ comb.} = \frac{(masa\ biomasa) * (100 - \%Humedad\ biomasa)}{Peso\ molecular\ biomasa} \quad (Ec. 19)$$

Logrando así determinar la cantidad de oxígeno necesario al multiplicar las moles de biomasa por el factor estequiométrico para combustión completa.

Finalmente, se establece el valor de ER que se va a analizar y teniendo en cuenta el contenido de oxígeno presente en el aire, se obtiene la cantidad de aire alimentada al proceso, así:

$$n_{aire.} = \frac{ER \times n_{O_2\ estequiométrica}}{0,21} \quad (Ec. 20)$$

Apéndice F. Cálculos Balance de Masa

Mediante el siguiente balance se logra estimar el flujo de syngas limpio para cada valor de ER en la zona donde se dan las condiciones de gasificación.

Se inicia desde el cálculo del flujo de aire seco alimentado, mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Flujo de aire seco} = \text{Flujo aire húmedo} \times \left(1 - \frac{g \text{ agua}}{g \text{ aire seco}}\right) \quad (\text{Ec. 21})$$

A partir de este dato, junto a la biomasa alimentada, considerando que es un reactor por lotes y el suministro de oxígeno está en base a la cantidad de biomasa que se encuentra en las zonas de oxidación y reducción, se procede a calcular la relación entre aire seco y biomasa alimentada.

$$\frac{kg \text{ aire seco}}{kg \text{ biomasa}} = \frac{\text{Flujo aire seco}}{\frac{\text{Cantidad biomasa zona combustión y reducción}}{\text{Tiempo de zona de operación}}} \quad (\text{Ec. 22})$$

Mediante esta relación, se determina las moles de nitrógeno que se están alimentando, lo cual equivale a la fracción presente en el aire seco, más la que posee la biomasa, de la siguiente manera:

$$\frac{0,71 \cdot \frac{kg \text{ aire seco}}{kg \text{ biomasa}} + \% \text{ Nitrógeno en biomasa}}{\text{Peso molecular } N_2} = \left[\frac{kmol N_2}{kg \text{ biomasa}} \right] \quad (\text{Ec. 23})$$

Posteriormente, considerando que el nitrógeno se comporta como inerte en las reacciones, se tiene la siguiente igualdad:

$$\frac{N_{entrada N_2}}{kg \text{ biomasa}} = \frac{N_{salida N_2 \text{ syngas}}}{kg \text{ biomasa}} \quad (\text{Ec. 24})$$

De esta manera, despejando las moles totales de salida y teniendo la cantidad de biomasa que se alimenta, se calcula las moles del syngas obtenido.

$$\frac{N^{salida}}{kg \text{ biomasa}} = \frac{\frac{N^{entrada}_{N_2}}{kg \text{ biomasa}}}{\% \text{ molar } N_2 \text{ syngas}} \quad (Ec. 25)$$

Rendimiento de biochar

El rendimiento en masa de biochar, está dado por la producción en masa de este por cada kilogramo de biomasa, el cual se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Y_{char} = \frac{m_{char} \cdot (1 - H_{char} - C_{char})}{m_{combustible} \cdot (1 - H_{combustible} - C_{combustible})} \quad (Ec. 26)$$

Donde $m_{char}(kg)$ corresponde a la masa que queda de biochar después del proceso de gasificación, H_{char} y C_{char} , corresponde a su porcentaje de humedad y cenizas, $m_{combustible}(kg)$ corresponde a la masa inicial de la biomasa y $H_{combustible}$ y $C_{combustible}$, corresponde a su porcentaje de humedad y cenizas (Díez & Pérez, 2019).

Apéndice G. Curvas de TGA del Biochar**Figura G 1. Curva TGA del Biochar**