PRODUCCIÓN DE GAS DE SINTESIS A PARTIR DE LA BIOMASA *Pinus patula.*

Eliud Santiago Dickens Aviles

Seleccione tipo de documento para optar al título de Ingeniero Químico

Modalidad de Práctica

Semestre de Industria

Mariana Peñuela Vásquez , Doctor (PhD) en Ingeniería Química

María Luisa Botero Vega , Doctor (PhD) en Ingeniería Química

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Química

Medellín, Antioquia, Colombia

2025

Cita	(Dickens Aviles, 2025)
Referencia	Dickens Aviles. (2025). PRODUCCIÓN DE GAS DE SINTESIS A PARTIR DE LA BIOMASA *Pinus patula* [Informe de práctica]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	

creative commons CC BY NC SA

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
Vicerrectoría de Docencia

Sistema de Bibliotecas

Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: http://bibliotecadigital.udea.edu.co

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mi mamá, mi papá, mis hermanos y amigos, que me apoyaron desde el principio y gracias a ellos soy quién soy hoy en día

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a la profesora María Luisa Botero Vega por permitirme dar mis primeros pasos como ingeniero químico en el grupo de investigación ISEC2. A la profesora Mariana Peñuela Vásquez y al grupo de investigación Bioprocesos, por abrirme las puertas al ámbito de la investigación y hacer que me enamore aún más de la ingeniería, además de permitirme conocer a personas maravillosas dentro del grupo, que contribuyeron cada día a mi formación personal y profesional.

A mi madre Magalis, a mi padre Edwin, y a mis amigos en especial Ana Sofía, Daniel Velásquez, Daniel Barrera, Juan Guillermo García, Juan Pablo Ramos, Hugo Zapata, Mateo Cardona y Estefanía Restrepo—, gracias por acompañarme en este proceso y brindarme siempre un aliento para seguir adelante.

Tabla de contenido

Resumen 7

Abstract 8

1. Introducción 9

2. Objetivos 10

2.1 Objetivo general 10

2.2 Objetivos específicos 10

3. Marco teórico 10

3.1. Gasificación: Definición y Proceso 10

3.2. Diferencia entre Gasificación y Pirolisis. 12

3.3. Gasificador *Downdraft* 13

4. Metodología 14

4.1. Caracterización de la Biomasa. 14

4.2 Operación del reactor. 14

4.3. Planeación de experimentos. 16

5. Análisis de resultados 18

6. Conclusiones y recomendaciones 30

Referencias 32

Anexos 34

Lista de tablas

Tabla 1. Análisis próximo, análisis último y propiedades de la biomasa. 18

Tabla 2. Variables de proceso para las distintas pruebas de Gasificación. 18

Tabla 3. Resultados de las pruebas de gasificación. 26

Tabla 4. Composición de los gases y poder calorífico inferior a distintos ER. 27

Tabla 5. Comparación de CGE% y CCE% con la literatura. 28

Lista de figuras

Figura 1. Representación de un Reactor DownDraft. 13

Figura 2. Diagrama del sistema de gasificación VERANO I. 15

Figura 3. Ubicación de las termocuplas en el Reactor. 19

Figura 4. Perfiles de temperatura en el reactor con ER = 0.2. 20

Figura 5. Concentración del SynGas de salida con ER = 0.2. 21

Figura 6. Perfiles de temperatura en el reactor con ER = 0.25. 22

Figura 7. Concentración del SynGas de salida con ER = 0.25. 23

Figura 8. Perfiles de temperatura en el reactor con ER = 0.3. 24

Figura 9. Concentración del SynGas de salida con ER = 0.3. 25

Figura 10. Eficiencias en función del ER. 28

Figura 11. Alquitranes producidos en los procesos de gasificación. 29

Figura 12. Sistema de gasificación de la UPB sede Montería (Gómez, 2021). 30

Figura 13. Configuración del sistema de limpieza de SynGas (Asudullah, 2014). 31

Figura 14. Propuesta del nuevo sistema de gasificación VERANO I. 31

Siglas, acrónimos y abreviaturas

ER	Relación de equivalencia.
CGE%	Eficiencia del gas frío.
CCE%.	Porcentaje de conversión de carbono.
V_g	Volumen del gas.
VERANO I	Vehículo Escuela en energías renovables para Áreas no interconectadas.
SynGas	Gas de síntesis.
LHV	Poder calorífico inferior.
BioSNG	Biometano.
A/F	Relación Aire/Combustible.

Resumen

La gasificación es un proceso termoquímico esencial para la conversión de biomasa en gas de síntesis (SynGas), el cual se emplea como insumo en la obtención de compuestos de alto valor agregado, tales como metanol, hidrógeno o energía eléctrica. En este estudio se plantea como objetivo la puesta en marcha y operación estable del sistema de gasificación VERANO I, evaluando la biomasa *Pinus patula* y la influencia de las condiciones operativas sobre la calidad del gas producido, medida a través de su poder calorífico inferior (Lower Heating Value, LHV). Para ello, se realiza una caracterización completa de la biomasa, considerando su composición química mediante análisis último, así como su contenido de humedad y poder calorífico mediante análisis próximo. Posteriormente, se lleva a cabo el proceso de gasificación en un reactor tipo *Down Draft*, donde se analiza la composición volumétrica del SynGas generado empleando un analizador de gases, este mide de manera continua el gas a la salida. Finalmente, se determina la eficiencia del proceso y, a partir de un diseño experimental, se estudia el efecto de las variables de entrada: la relación de equivalencia (ER) y el contenido de humedad de la biomasa. Debido a la dificultad para controlar este último parámetro, la humedad no se considera un factor significativo en el análisis. Con base en los perfiles de temperatura y los resultados de eficiencia, se proponen mejoras en el sistema de operación, particularmente en el encendido y en la etapa de acondicionamiento del gas. En este sentido, se plantea la sustitución del sistema de acondicionamiento térmico actual por un burbujeador, con el fin de optimizar la limpieza del gas, reducir la presencia de alquitranes y aumentar la eficiencia global del proceso.

Palabras clave: Gasificación, Biomasa, Pirolisis, SynGas.

Abstract

Gasification is a thermochemical process essential for converting biomass into synthesis gas (SynGas), which is used as an input in the production of high value-added compounds such as methanol, hydrogen, or electrical energy. The objective of this study is to commission and ensure the stable operation of the VERANO I gasification system, evaluating the impact of the use of *Pinus patula* biomass and operating conditions on the quality of the gas produced, measured by its lower heating value (LHV). To this end, a complete characterization of the biomass is carried out, considering its chemical composition through ultimate analysis, as well as its moisture content and calorific value through proximate analysis. Subsequently, the gasification process is carried out in a Down Draft reactor, where the volumetric composition of the SynGas generated is analyzed using a gas analyzer. Finally, the efficiency of the process is determined and based on an experimental design, the effect of the input variables is studied: the equivalence ratio (ER) and the moisture content of the biomass. Due to the difficulty in controlling the latter parameter, moisture is not considered a significant factor in the analysis. Based on the temperature profiles and efficiency results, improvements to the operating system are proposed, particularly in the ignition and gas conditioning stages. In this regard, the replacement of the current thermal conditioning system with a bubbler is proposed to optimize gas cleaning, reduce the presence of tars and increase the overall efficiency of the process.

Keywords: Gasification, Biomass, Pyrolysis, SynGas

1. Introducción

El gas de síntesis (SynGas), es una mezcla compuesta principalmente por hidrógeno (H_2) y monóxido de carbono (CO), desempeña un papel fundamental en el desarrollo de energías alternativas. A partir de este gas se pueden obtener productos de alto valor agregado, como el biometano (BioSNG) y el metanol, este último ampliamente utilizado en la producción de combustibles. La producción del gas de síntesis se logra mediante la gasificación de hidrocarburos, carbón o residuos orgánicos.

Actualmente, el 70% del gas de síntesis se obtiene de la gasificación del carbón, menos del 15% proviene del gas natural y otros derivados del petróleo, y un porcentaje menor se produce a partir de biomasa (Inamuddin, 2019). Esta situación resalta la necesidad de buscar fuentes sostenibles, como la biomasa, proveniente de residuos vegetales generados en diversos procesos industriales como materia prima para gasificar.

En este trabajo se llevará a cabo la producción de SynGas a partir de la biomasa *Pinus patula*. Inicialmente, se realizará su caracterización con el fin de determinar sus propiedades físicas y composición, además de la puesta a punto del equipo para lograr una buena gasificación. Luego, se someterá a gasificación en el reactor DownDraft VERANO I bajo condiciones del proceso controladas para obtener el gas de síntesis. Finalmente, se llevará a cabo un diseño de experimentos con el fin de encontrar las mejores condiciones del proceso de gasificación.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar diferentes condiciones para el sistema de gasificación VERANO I y su influencia en la calidad del SynGas a partir de la biomasa *Pinus patula.*

2.2 Objetivos específicos

- Determinar los parámetros y componentes operativos clave para el correcto funcionamiento del equipo de gasificación.
- Establecer, basados en la literatura, las variables de proceso más importantes que influencien la calidad del SynGas.
- Realizar un diseño experimental que permita elegir las mejores condiciones de operación en el gasificador,

3. Marco teórico

3.1. Gasificación: Definición y Proceso

La gasificación es el proceso de conversión de materia prima sólida o líquida en un combustible gaseoso útil o en materia prima química. Este gas puede quemarse para liberar energía o utilizarse en la producción de productos químicos de valor agregado. La gasificación y la combustión son dos procesos termoquímicos estrechamente relacionados, pero con una diferencia clave: la gasificación almacena energía en los enlaces químicos del gas producido, mientras que la combustión rompe esos enlaces para liberar energía. Además, la gasificación añade hidrógeno y elimina carbono del material de alimentación, lo que da como resultado gases con una mayor proporción de hidrógeno a carbono (H/C), mientras que la combustión oxida el hidrógeno y el carbono en agua y dióxido de carbono, respectivamente (Basu, 2018).

Un proceso típico de gasificación de biomasa puede incluir los siguientes pasos:

- Secado del material de alimentación.
- Descomposición térmica o pirolisis.
- Combustión parcial de algunos gases, vapores y residuos sólidos (char).
- Gasificación de los productos descompuestos.

Las reacciones que se llevan a cabo en el proceso de Gasificación están dadas por las reacciones que presenta (Gai, 2012) que involucran carbono elemental, las de oxidación, metanación, reformado de metano, etcétera, y son las siguientes:

Reacciones de oxidación:

$$R1: \quad C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$$

$$R2: \quad C + O_2 \rightarrow CO_2$$

Reacciones de Boudouard:

$$R3: \quad C + CO_2 \rightarrow 2CO$$

Reacción agua y gas:

$$R4: \quad C + H_2O \rightarrow CO + H_2$$

$$R5: \quad C + 2H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$$

$$R6: \quad CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + 2H_2$$

Reacciones de Metanación:

$$R7: \quad C + 2H_2 \rightarrow CH_4$$

$$R8: \quad CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$$

$$R9: \quad CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$$

$$R10: \quad 2C + 2H_2O \rightarrow CH_4 + CO_2$$

Reacciones de reformado de metano:

$$R11: \quad CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$$

$$R12: \quad CH_4 + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 4H_2$$

Reacciones de Crackeo:

$$C_nH_m + H_2 \leftrightarrow C_xH_y + H_2$$

3.2. Diferencia entre Gasificación y Pirolisis.

La pirolisis es un proceso de descomposición termoquímica de la biomasa que ocurre en ausencia total de agentes oxidantes o con un suministro limitado que no permite una gasificación significativa. Este proceso también forma varias etapas iniciales de la gasificación. Durante la pirolisis, las moléculas de hidrocarburos complejos de la biomasa se descomponen en moléculas más pequeñas y simples en forma de gas, líquido y residuo sólido (char).

La pirolisis se asemeja a procesos como el cracking, la devolatilización, la carbonización, la torrefacción y la destilación seca, pero no tiene similitud con la gasificación, ya que esta última implica reacciones químicas con un agente externo conocido como medio de gasificación.
Las condiciones de operación también marcan una diferencia importante:

- Pirolisis: Se lleva a cabo en un rango de temperatura de 300-650 °C.
- Gasificación: Ocurre a temperaturas entre 800-1000 °C.
- Torrefacción: Se realiza a temperaturas más bajas, de 200-300 °C.

Uno de los productos sólidos resultantes de la pirolisis es el biochar, que ofrece una alternativa a la quema completa de residuos agrícolas o forestales, evitando la liberación inmediata de carbono a la atmósfera. El biochar puede retener parte de ese carbono en una forma sólida y estable.
Por otro lado, el proceso de gasificación se lleva a cabo en presencia controlada de un agente oxidante, como aire, oxígeno o vapor, a temperaturas más elevadas habitualmente entre 700 °C y 1,200 °C, con el objetivo de transformar la materia prima en un gas combustible conocido como gas de síntesis. Este gas, compuesto principalmente por monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H_2), metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), puede ser utilizado como fuente de energía o insumo industrial. A diferencia de la pirólisis, la gasificación prioriza la obtención de un producto final principalmente gaseoso, capaz de almacenar la energía química contenida en los enlaces moleculares.

3.3. Gasificador *Downdraft*

Los gasificadores downdraft han demostrado ser altamente efectivos en la operación de motores debido a su bajo contenido de alquitrán. En estos gasificadores, el aire entra en contacto con la biomasa en proceso de pirolisis antes de alcanzar la zona de char, donde se produce una llama similar a la de una cerilla encendida. Durante este proceso, el calor generado por la combustión de los compuestos volátiles mantiene la pirolisis activa.

A medida que la pirolisis avanza dentro del gasificador, el suministro de aire limitado se consume rápidamente, enriqueciendo la composición de la llama. Al final de la zona de pirolisis, los gases generados están compuestos principalmente por proporciones similares de CO_2, H_2O, CO y H_2. Este fenómeno, denominado pirolisis con llama (*flaming pyrolysis*), es el mecanismo principal de generación de gases combustibles en los gasificadores *downdraft*. Además, este proceso permite la eliminación de hasta un 99% de los alquitranes, lo que mejora significativamente la calidad del gas producido y su aplicabilidad en motores de combustión interna (Reed, 1988).

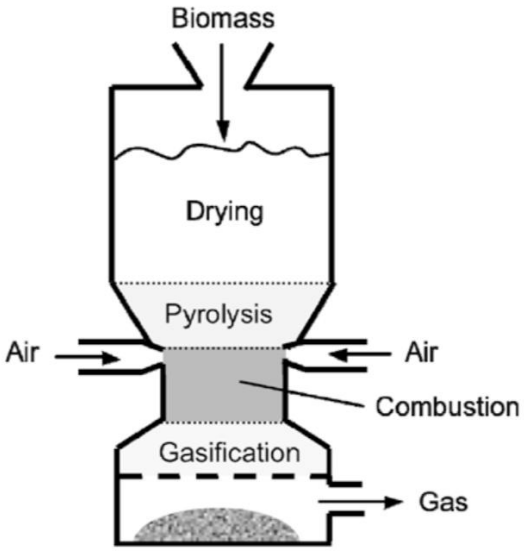


Figura 1. *Representación de un Reactor DownDraft.*

4. Metodología

Se llevará a cabo un proceso de gasificación, entendido como la conversión termoquímica de biomasa en un gas combustible conocido como gas de síntesis. Este proceso se realizará mediante la aplicación controlada de un agente gasificante (en este caso, aire) en un entorno de alta temperatura, permitiendo transformar la materia orgánica en un gas compuesto principalmente por monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H_2), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y otros componentes en menor proporción.

4.1. Caracterización de la Biomasa.

Previo a la operación del reactor, se llevará a cabo la caracterización de la biomasa utilizada como materia prima. Esta caracterización incluirá la determinación de la humedad y la composición elemental (CHONS), con el fin de conocer su potencial energético y su comportamiento dentro del gasificador. Para determinar la humedad, se realizará un proceso de secado controlado en el que se medirá la variación de masa de la biomasa antes y después del secado. A partir de esta diferencia de masa, se calculará el contenido de humedad de manera indirecta. Esta propiedad será fundamental, ya que un alto contenido de agua podrá afectar negativamente la eficiencia térmica del proceso de gasificación, generando mayores pérdidas energéticas por evaporación.

El análisis elemental CHONS (Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, Nitrógeno y Azufre) se realizará para obtener una visión detallada de la composición de la biomasa. Este análisis proporcionará información esencial sobre la capacidad de la biomasa para generar compuestos energéticos durante el proceso, así como para predecir la composición esperada del gas de síntesis.

4.2 Operación del reactor.

El proceso experimental se realizará en un gasificador tipo *downdraft* de la **Figura 1**. Inicialmente, se cargará con una cama de carbón vegetal en el reactor como material de encendido. A través de la parte intermedia del reactor, se aplicará calor externo hasta alcanzar las condiciones térmicas adecuadas para el desarrollo progresivo de las distintas zonas térmicas del proceso.

El sistema se monitoreará hasta que la zona de secado alcance temperaturas entre 100 °C y 120 °C, permitiendo la eliminación de la humedad contenida en la biomasa. En la zona de pirolisis se

alcanzarán temperaturas de 200 °C a 600 °C, donde los compuestos orgánicos volátiles de la biomasa se descompondrán en gases, alquitrán y carbón.

Y en la zona de combustión, con temperaturas cercanas a los 800 °C, se promoverá la oxidación parcial del material carbonoso. Una vez estabilizada la temperatura en el gasificador, se alimentará de manera controlada la biomasa fresca desde la parte superior del reactor.

Durante la operación, se recolectarán muestras del gas de síntesis a la salida del gasificador. Estas muestras se analizarán en continuo mediante un analizador de gases portátil para determinar la composición del gas (CO, CO_2, H_2, CH_4 y O_2), además con las ecuaciones que reporta (Rabea, 2021) se calculará el poder calorífico inferior (LHV) a partir de la siguiente ecuación.

$$LHV = 10.79 \cdot H_2 + 12.636 \cdot CO + 35.82 \cdot CH_4 \qquad (1)$$

El sistema de gasificación cuenta con 2 partes, la zona de reacción y la zona de acondicionamiento térmico y limpieza del gas, cómo se evidencia en la Figura 2.

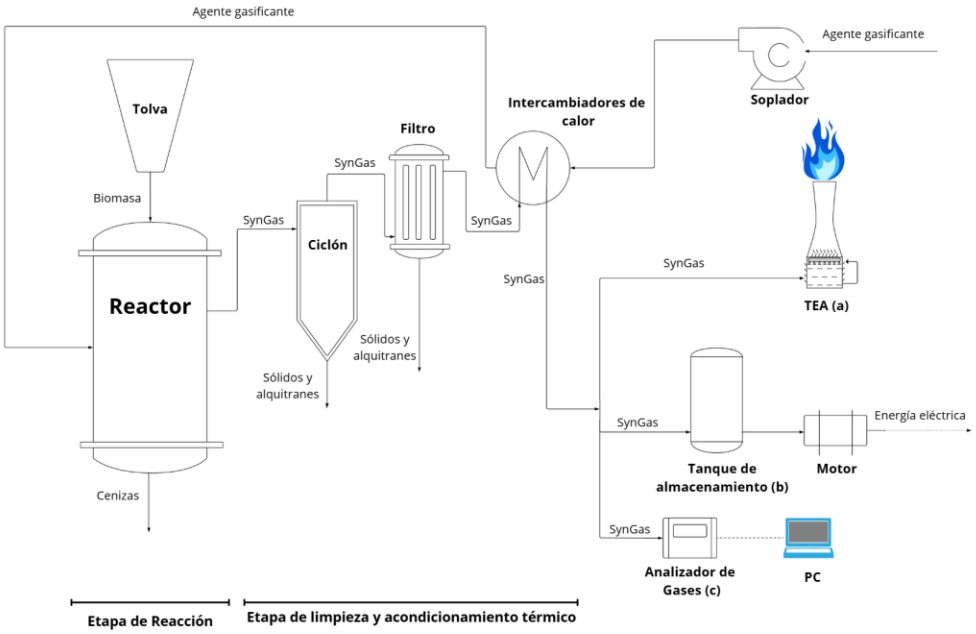


Figura 2. *Diagrama del sistema de gasificación VERANO I.*

4.3. Planeación de experimentos.

Con el sistema estabilizado y operando dentro de las condiciones térmicas requeridas, se procederá a la ejecución de diversos ensayos experimentales. Estos estarán enfocados en analizar cómo distintas condiciones operativas afectarán la calidad del gas producido. En particular, se estudiarán dos factores clave: la relación aire/biomasa (A/F) y el contenido de humedad de la biomasa alimentada. Estas variables serán seleccionadas por su influencia directa tanto en la eficiencia del proceso como en la composición del gas generado. La relación de aire/biomasa se puede expresar en función del ER, este es el factor de equivalencia entre el flujo de aire para gasificar y el flujo de aire estequiométrico para que se lleve a cabo combustión completa y se expresa de la siguiente forma.

$$ER = \frac{\left(\frac{\dot{m}_{aire}}{\dot{m}_{biomasa}}\right)_{actual}}{\left(\frac{\dot{m}_{aire}}{\dot{m}_{biomasa}}\right)_{estq}} \qquad (2)$$

Dónde la relación estequiométrica se obtiene a partir de la siguiente ecuación.

$$\left(\frac{\dot{m}_{aire}}{\dot{m}_{biomasa}}\right)_{estq} = \frac{1.293}{0.21}(1.866C + 5.55H + 0.7S - 0.7O) \qquad (3)$$

Para estructurar este análisis, se realizarán 3 experimentos que permitirá evaluar de manera sistemática el efecto individual y combinado de las variables mencionadas sobre las respuestas del sistema. Se emplearán 4 kg de biomasa para cada experimento, con los resultados de las pruebas será posible explorar los múltiples niveles de cada variable, así como las posibles interacciones entre ellas. Las respuestas que se medirán serán la composición del gas de síntesis —particularmente el porcentaje de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H_2)— y su poder calorífico inferior (LHV), que servirá como un indicador directo de su calidad energética.

Además, se determinará la eficiencia del proceso por medio de las ecuaciones que reporta Rabea et al, 2021, esto con el fin de evidenciar qué tan viable es la conversión del material carbonoso en

gas. La eficiencia del gas frío es la relación que hay entre el poder calorífico entre la biomasa que ingresa y el gas que se produce.

$$CGE\% = \frac{[LHV]_{gas} \times V_g}{[LHV]_{biomass}} \times 100 \qquad (4)$$

Dónde la variable V_g es el volumen de gas que se produce por la masa de biomasa, y se puede calcular de la siguiente forma.

$$V_g = \frac{79Q_{air}}{N_2 \times m_b} \qquad (5)$$

De la ecuación anterior se evidencia que depende el flujo de aire para gasificar, la concentración de N_2 y m_b es la velocidad de consumo de la biomasa, otro parámetro para medir la eficiencia del proceso es evaluando la conversión de carbono que puede ser calcula de la siguiente forma

$$CCE\% = \frac{12(CO + CO_2 + CH_4)}{22.4 \cdot C} \times V_g \times 100 \qquad (6)$$

Dónde C representa la fracción de carbono de la biomasa del análisis ultimo realizado. Con estas ecuaciones se pueden definir las variables de salida y qué tan viable es el proceso en términos energéticos y de conversión de la biomasa.

5. Análisis de resultados

En el sistema de gasificación VERANO I, se procesó la biomasa *Pinus patula*, en el cual se controlaron las temperaturas en el reactor, esto con el fin de que las reacciones se den y se pueda obtener un gas de buena calidad. A continuación, se realiza un resumen de las características de la biomasa Tabla 1, a partir de las cuales se determina el flujo de aire en el que debe funcionar el reactor de gasificación. Ramos, 2017 y García, 2016 presentan caracterizaciones de biomasa de *Pinus patula* de diferentes regiones Colombia, encontrando similitudes con la caracterización presentada en este trabajo.

Tabla 1. *Análisis próximo, análisis último y propiedades de la biomasa.*

Pinus Patula			
Análisis próximo			
	Este trabajo	Ramos, 2017	García, 2016
Material volátil (VM)	84,64	81,12	82,14
Carbono fijo (FC)	14,09	18,62	17,64
Cenizas	0	0,26	0,23
Humedad	8	-	-
Análisis último			
Carbono	50,54	49,95	49,78
Hidrogeno	7,08	5,94	6,03
Oxigeno	41,11	43,97	44,19
Nitrógeno	0,7	0,14	-
Azufre	0,57	-	-
Propiedades			
HHV [MJ/kg]	21,78	19,84	18,48
LHV [MJ/kg]	19,73	-	-
Relación estequiométrica	6,48	-	-
Densidad aparente [kg/m^3]	631,3	-	-

Tabla 2. *Variables de proceso para las distintas pruebas de Gasificación.*

Número de prueba	**ER**	**Flujo de Aire [kg/h]**	**Tiempo de gasificación [min]**
1	0.2	4.798	50
2	0.25	5.997	130
3	0.3	7.196	200

Para los resultados de las pruebas de gasificación, se tiene que los indicadores de temperatura como TI-01, TI-02 y TI-03 hacen referencia a la zona de pirolisis, combustión y reducción respectivamente. En la Figura 3 se evidencia la ubicación de las termocuplas dentro del reactor.

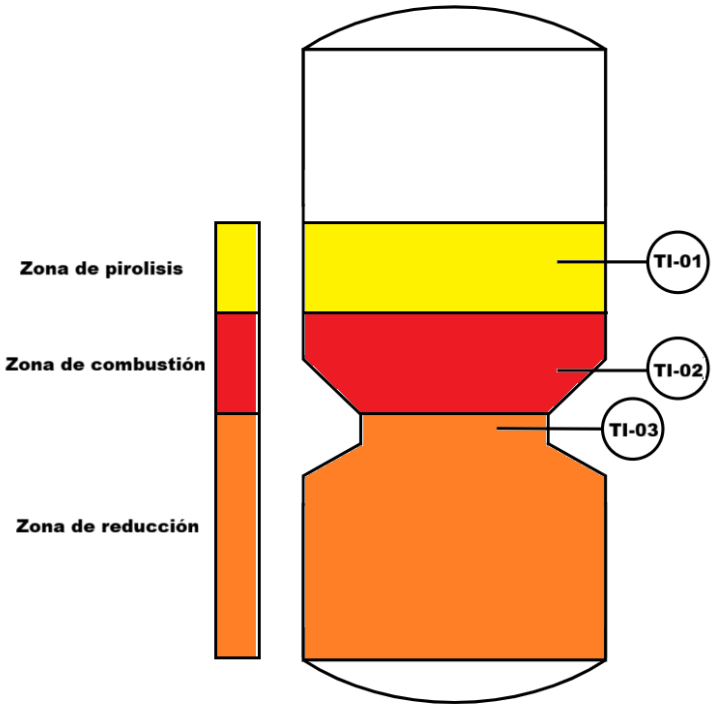


Figura 3. *Ubicación de las termocuplas en el Reactor.*

La Biomasa se encuentra solo en la zona de pirolisis y combustión, en la zona de reducción están todos los gases producidos, las temperaturas más importantes del reactor son TI-02 y TI-03, ya que en estas ocurre las reacciones de crackeo de alquitranes y reacciones que promueven la producción de los gases combustibles, entendiendo esto se presentan todas las pruebas realizadas con las distintas Relaciones de Equivalencia (ER). Los datos fueron registrados por medio de un PLC y se exportan a un código en Python que gráfica las temperaturas y las composiciones medidas en el gas de salida por medio del analizador de gases.

Entonces, la prueba 1 consistió en gasificar la biomasa de pino con una relación de equivalencia (ER) igual a 0.2, esto se refiere a un flujo de aire 4.79 Kg/h para procesar 4 kg/h de biomasa y a partir de estas condiciones de operación se presentan los resultados de temperatura y composición del gas de salida en la Figura 4 y Figura 5 respectivamente.

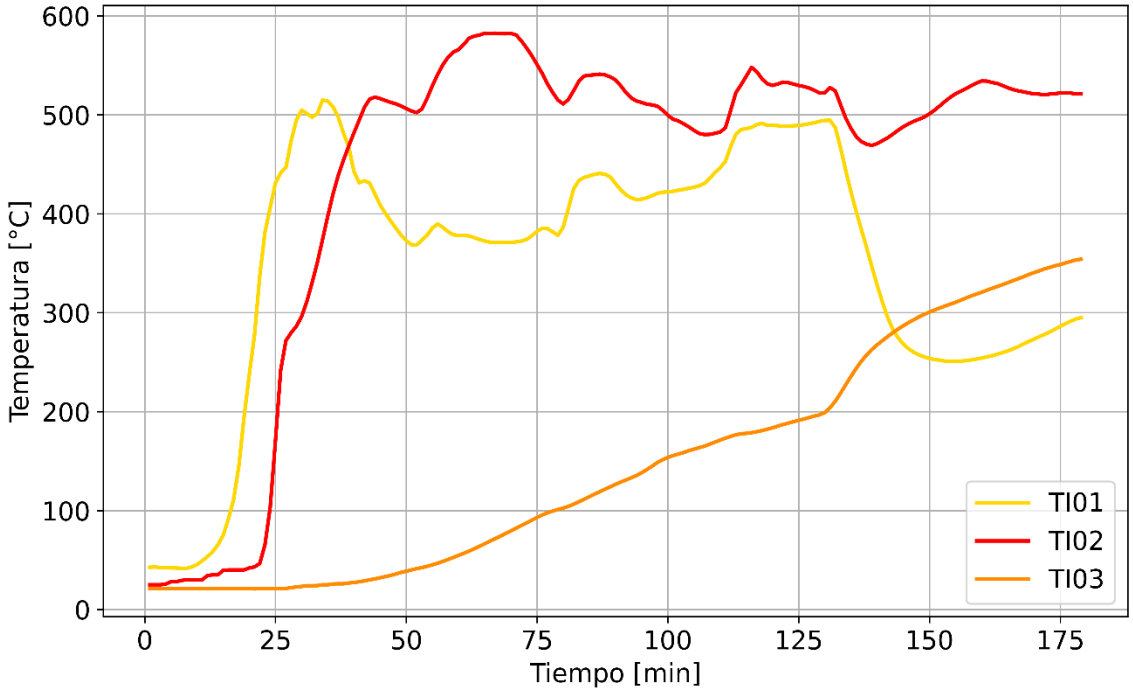


Figura 4. *Perfiles de temperatura en el reactor con ER = 0.2.*

La Figura 4 presenta el perfil de temperatura registrado a lo largo de todo el proceso de gasificación. En esta se observa claramente el incremento progresivo de la temperatura durante la etapa de encendido, la cual tuvo una duración aproximada de una hora, hasta alcanzar las condiciones operativas requeridas en el reactor. Posteriormente, en el minuto 130 se realiza la alimentación de la biomasa, evento que puede identificarse en la gráfica por la disminución temporal de la temperatura registrada por las termocuplas TI-01 y TI-02. Esta caída se debe al ingreso del material fresco, que inicialmente absorbe parte del calor del sistema antes de que se estabilice nuevamente la reacción.

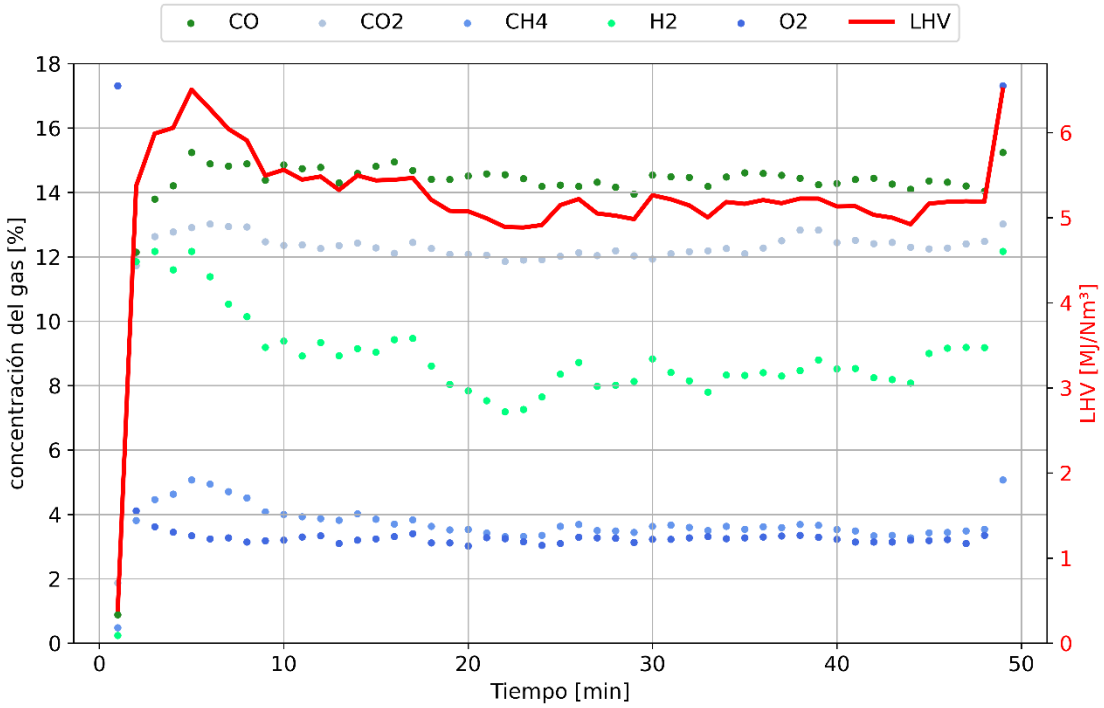


Figura 5. *Concentración del SynGas de salida con ER = 0.2.*

Por otra parte, la Figura 5 muestra la evolución de la composición del gas de síntesis desde el momento en que se introduce la biomasa hasta la finalización del proceso. En esta figura se aprecia que el poder calorífico del gas, representado por la línea roja, se mantiene relativamente constante a lo largo del tiempo, sin presentar variaciones significativas que comprometan la calidad del gas producido. Asimismo, se evidencia que la concentración de los gases no deseados, principalmente dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4), se mantiene dentro de los rangos esperados para una gasificación convencional, lo que indica un comportamiento estable del sistema y una operación adecuada durante el ensayo.

La prueba 2 consistió en gasificar la biomasa de pino con una relación de equivalencia (ER) igual a 0.25, esto se refiere a un flujo de aire 5.997 kg/h para procesar 4 kg/h de biomasa y a partir de estas condiciones de operación se presentan los resultados de temperatura y composición del gas de salida en la Figura 6 y Figura 7 respectivamente.

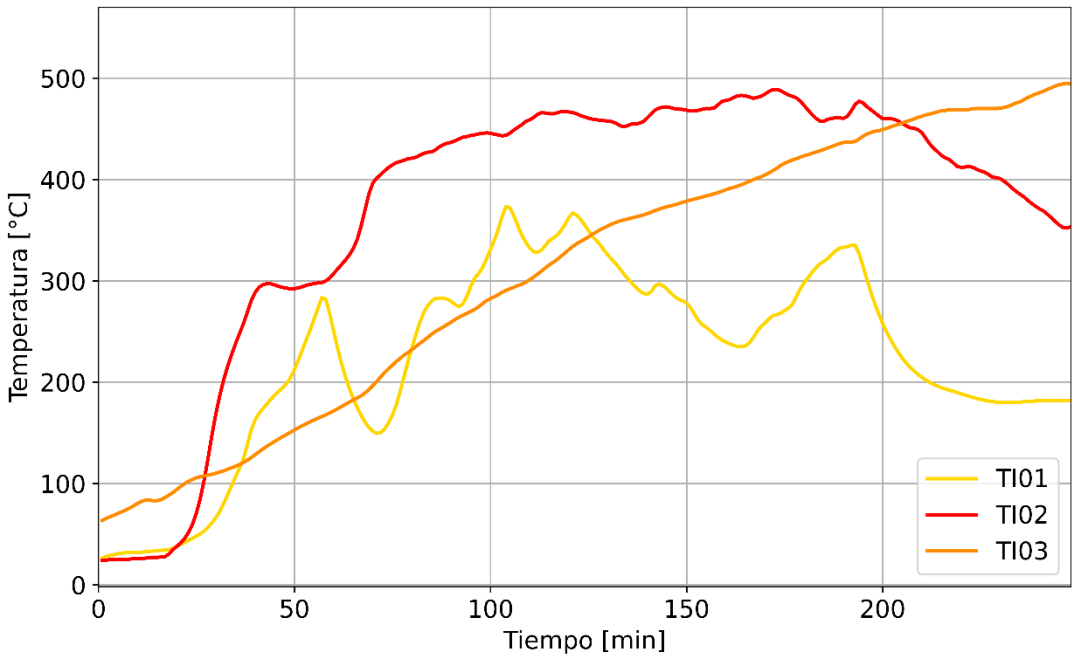
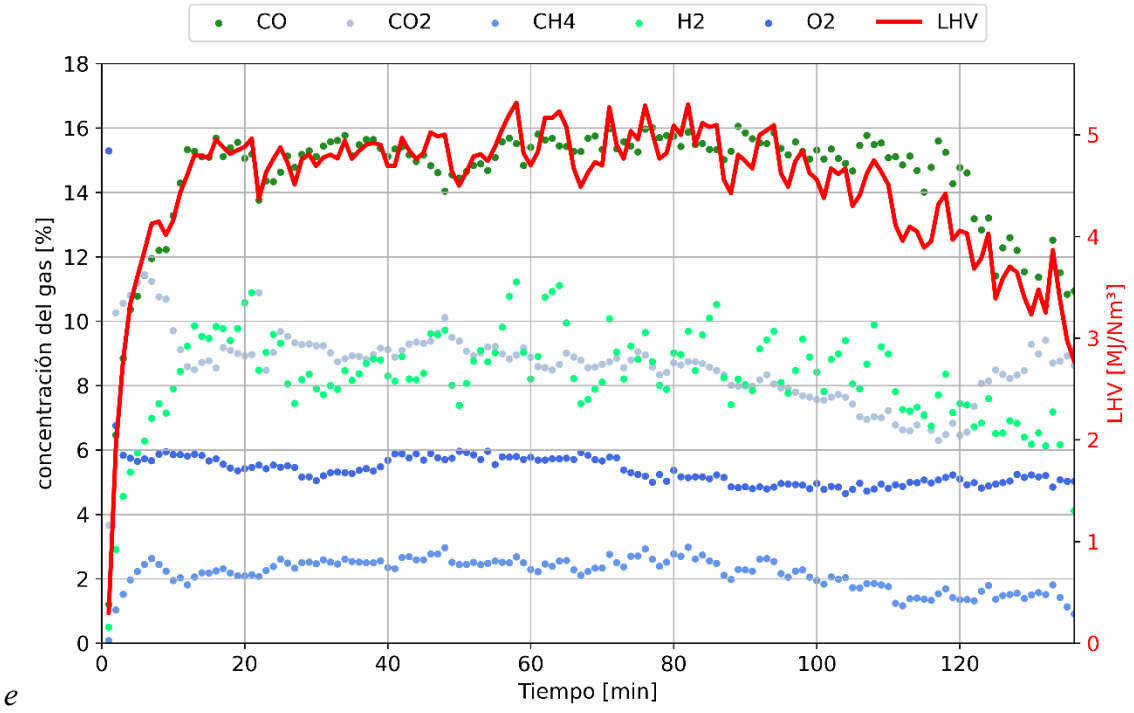


Figura 6. *Perfiles de temperatura en el reactor con ER = 0.25.*

La Prueba 2 presentó un tiempo de encendido cercano a los 50 minutos, período durante el cual se alcanzaron las temperaturas óptimas para el inicio del proceso de gasificación. Una vez logradas estas condiciones, se procedió inmediatamente a la alimentación de la biomasa. A partir de este momento, se observa que la temperatura en la zona de reducción experimenta un incremento progresivo, lo cual tiene un impacto directo en la generación de una mayor cantidad de gases combustibles, predominando el monóxido de carbono (CO). Este comportamiento térmico evidencia una reacción más eficiente en esta etapa, favoreciendo la conversión de los componentes de la biomasa en gases de interés energético.



e

Figura 7. *Concentración del SynGas de salida con ER = 0.25.*

De manera complementaria, se identifica un comportamiento térmico más favorable en la zona de oxidación, asociada a la termocupla TI-02, que es la región donde se espera registrar las temperaturas más elevadas dentro del gasificador, condición necesaria para asegurar una buena calidad del gas de síntesis. La composición de los gases generados durante esta prueba se mantuvo estable con el transcurso del tiempo, mostrando un poder calorífico constante y aceptable, acompañado de una baja producción de dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4).

Además, se observó un pico pronunciado en la concentración de CO, lo que indica que en este valor de relación de equivalencia (ER) se alcanza un flujo de aire óptimo para el proceso de gasificación. Este resultado concuerda con lo reportado por Pérez et al. (2015), quienes señalan que los mejores desempeños en gasificación se obtienen con valores de ER en el rango 0.25–0.27, lo que respalda la adecuada operación del sistema en la condición evaluada.

Para la prueba 3 con un ER = 0.3 se tiene un flujo de aire de 7.196 kg/h, para procesar 4 kg/h de biomasa, con esas condiciones se extraen los datos del PLC y el analizador de gases con los que se se obtuvieron los siguientes gráficos de temperatura y composición del gas de salida.

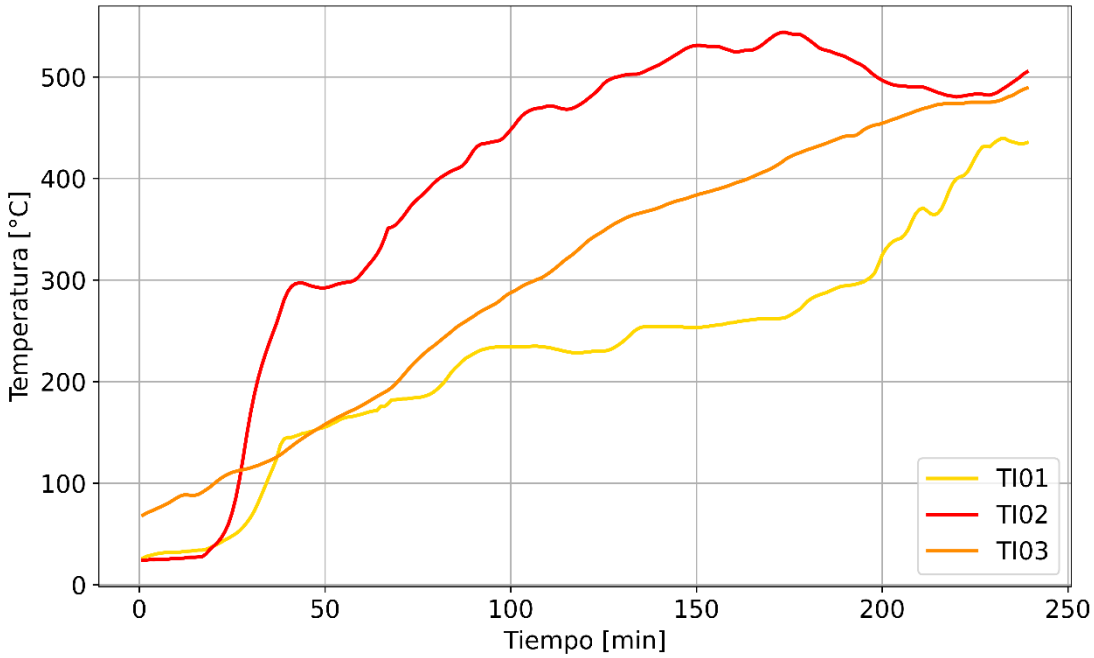


Figura 8. *Perfiles de temperatura en el reactor con ER = 0.3.*

La Prueba 3 presentó un tiempo de encendido aproximado de 50 minutos, periodo durante el cual se alcanzaron las condiciones térmicas adecuadas para iniciar la alimentación de la biomasa. En la Figura 8 se observa claramente una tendencia general al aumento de la temperatura en las tres zonas monitoreadas del gasificador (TI-01, TI-02 y TI-03) a lo largo del proceso. La zona de oxidación (TI-02) mantiene las temperaturas más elevadas, superando los 500 °C, lo que es consistente con el comportamiento esperado en este tipo de reactores, ya que en esta sección ocurre la combustión parcial que suministra el calor necesario para las reacciones posteriores.

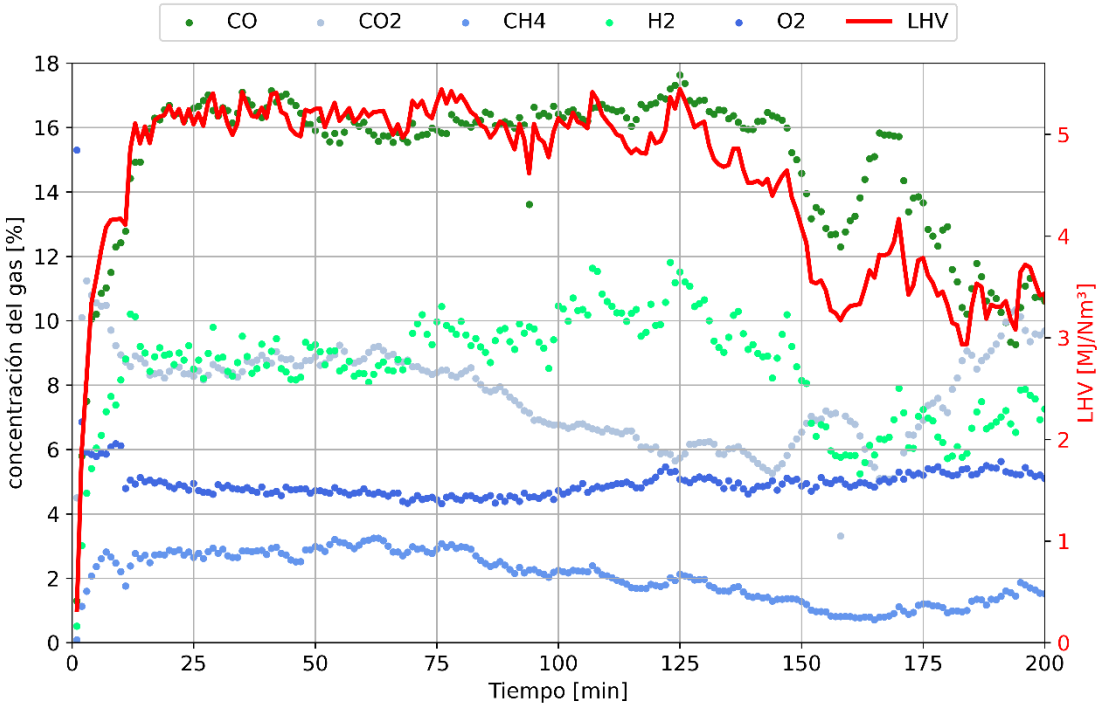


Figura 9. *Concentración del SynGas de salida con ER = 0.3.*

Las zonas TI-01 (zona de secado y pirólisis) y TI-03 (zona de reducción) muestran incrementos más graduales, alcanzando temperaturas intermedias que permiten el desarrollo adecuado de las reacciones endotérmicas de reducción, responsables de la formación de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H_2). Sin embargo, hacia el final del ensayo se observa una ligera caída en la zona de oxidación, lo cual sugiere una disminución en la intensidad de las reacciones, posiblemente asociada al agotamiento progresivo del material alimentado o a una reducción en el flujo de aire, afectando la estabilidad térmica global del sistema.

En la Figura 9 se presenta la evolución de la composición de los gases generados durante la prueba, junto con el poder calorífico inferior (LHV) del gas de síntesis. Al inicio de la alimentación se observa un aumento rápido en las fracciones de CO y H_2, alcanzando concentraciones estables durante gran parte del ensayo, lo que indica una buena conversión del material en la zona de reducción. No obstante, hacia la etapa final se evidencia una caída marcada en la concentración de estos gases combustibles (CO y H_2), acompañada de un aumento en la fracción de CO_2, fenómeno

que coincide con la reducción de temperatura observada en la figura anterior. Esto sugiere que la eficiencia de las reacciones de reducción disminuyó, posiblemente debido a un desequilibrio entre la disponibilidad de calor y el suministro de biomasa o aire. El poder calorífico inferior (LHV) presenta valores relativamente buenos y estables durante la mayor parte del ensayo, aunque ligeramente menores que en las pruebas anteriores, lo cual podría estar relacionado a estar más cerca a la combustión completa de la biomasa.

Se realiza la Tabla 3 a partir de lo mencionada anteriormente y de los resultados extraídos de las pruebas de gasificación, tomando como referencia los valores promedio de la composición de gases de salida durante todo el proceso, junto con el poder calorífico inferior (LHV), el valor de ER y el flujo de aire correspondiente

.

Tabla 3. *Resultados de las pruebas de gasificación.*

Número de prueba	ER	Composición del gas					LHV [MJ/Nm^3]
		CO	CO_2	CH_4	H_2	O_2	
1	0.20	14.145	12.125	3.707	8.823	3.829	4.067
2	0.25	14.453	8.859	2.151	8.247	5.419	3.487
3	0.3	13.983	8.235	2.012	8.182	4.962	3.370

En términos generales, las tres pruebas realizadas muestran un comportamiento térmico y composicional coherente con el proceso de gasificación *downdraft*. En todas se observó una etapa inicial de calentamiento que permitió alcanzar las temperaturas necesarias para el inicio de la gasificación, seguida por una fase de alimentación de biomasa en la que se estabilizaron las temperaturas en las zonas de oxidación y reducción. Este comportamiento térmico se reflejó directamente en la composición del gas de síntesis producido, destacándose concentraciones considerables de CO y H_2, con valores moderados de CH_4 y CO_2, lo que indica una conversión adecuada de la biomasa y un proceso de oxidación controlado. Adicionalmente, el poder calorífico inferior (LHV) mostró una tendencia estable durante el tiempo de operación, lo que sugiere que las condiciones de gasificación se mantuvieron constantes en cada prueba.

Con el objetivo de validar los resultados experimentales obtenidos, se realizó una comparación con valores reportados en la literatura para distintos valores de relación de equivalencia (ER). La Tabla

4 presenta esta comparación, donde se observa que las concentraciones de CO, CO_2, CH_4 y H_2, así como el LHV, se encuentran dentro de los rangos característicos reportados por diferentes autores para procesos de gasificación en reactores downdraft, lo que confirma la consistencia de los ensayos realizados con respecto a datos de referencia.

Tabla 4. *Composición de los gases y poder calorífico inferior a distintos ER.*

Autor	ER	Composición				LHV [MJ/Nm^3]
		CO	CO_2	CH_4	H_2	
Parathesi, 2025	0,2	17,44	10,15	2,75	7,47	4,25
	0,25	18,35	11,23	2,86	7,97	4,47
	0,3	19,75	12,78	3,05	8,47	4,78
Yoon, 2012	0,3	20,2	8,1	1,5	18,6	5,5

Finalmente, es importante destacar el papel determinante que desempeñan las reacciones de Boudouard ($C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO$) y de reformado de metano ($CH_4 + H_2O \rightleftharpoons CO + 3H_2$) en la calidad del gas de síntesis obtenido. Estas reacciones favorecen el incremento de la fracción de gases combustibles (CO y H_2) y, por consiguiente, contribuyen al aumento del poder calorífico del gas. Un control adecuado de la temperatura en la zona de reducción es esencial para promover estas transformaciones, ya que temperaturas insuficientes limitan la conversión de CO_2 y CH_4, generando una mezcla con menor valor energético y menor eficiencia global del proceso.

Al comparar los resultados experimentales con los valores reportados por otros autores Tabla 4, se evidencian diferencias significativas tanto en la composición gaseosa como en los valores de LHV. Estas discrepancias pueden atribuirse principalmente a limitaciones del sistema experimental, tales como la falta de un control preciso de la temperatura en las distintas zonas del reactor, la variabilidad durante la etapa de encendido y la inestabilidad en el suministro de aire y biomasa a lo largo de los ensayos. Dichos factores influyeron en el desarrollo incompleto de las reacciones clave, afectando directamente la eficiencia y la calidad del gas producido.

Se calcularon las eficiencias de gas frío (CGE%) y de conversión de carbono (CCE%) mediante las ecuaciones (4) y (6) con los datos obtenidos de las pruebas. Los valores obtenidos se

representan en la Figura 10, donde se aprecia que las eficiencias experimentales resultaron menores que las reportadas en la literatura (Parathesi, 2025 y Yoon, 2012).

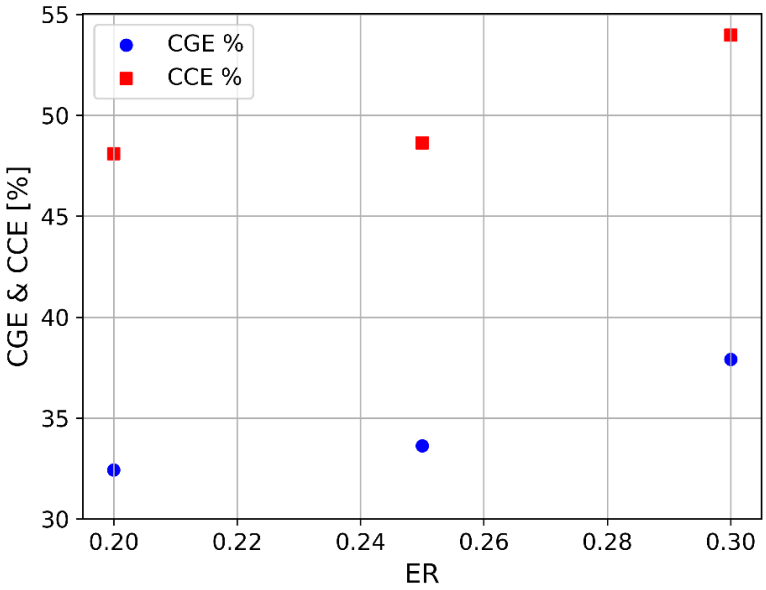


Figura 10. *Eficiencias en función del ER.*

Esto pone en evidencia que la falta de control en variables críticas del proceso, como la temperatura en la zona de combustión y reducción, tuvo un impacto negativo en el desempeño global del sistema. Además, las condiciones de operación favorecieron la formación de subproductos indeseados, como los alquitranes.

La Tabla 5 presenta una comparación directa de los valores de CGE% y CCE% obtenidos en este trabajo con los reportados por Parathesi et al, 2025 y Yoon et al, 2012.

Tabla 5. *Comparación de CGE% y CCE% con la literatura.*

Autor	ER					
	0,2		0,25		0,3	
	CGE%	CCE%	CGE%	CCE%	CGE%	CCE%
Este trabajo (2025)	32.4	48.1	33.6	48.6	37.9	53.9
Yoon (2012)	53	-	55	-	62	-
Parathesi (2025)	56	50	59	56	65	60

Se observa que, para un mismo rango de ER, los resultados de este trabajo se encuentran por debajo de los valores de la literatura, confirmando que las limitaciones operativas redujeron la eficiencia del proceso.

Adicionalmente, al final de cada ensayo se observó una elevada producción de alquitranes Figura 11, lo cual refleja que en la zona de combustión las condiciones térmicas alcanzadas no fueron las óptimas para promover el craqueo de estos compuestos. La acumulación de alquitranes tiene un efecto negativo sobre el sistema, ya que disminuye la eficiencia global del proceso, reduce la vida útil del gasificador y genera dificultades operativas como la necesidad de detener el equipo para realizar limpiezas frecuentes, además, el sistema de limpieza tiene puntos fríos en los cuales los alquitranes se condensan y saturan el sistema. Esto limitó el número de ensayos que fue posible realizar de forma continua.



Figura 11. *Alquitranes producidos en los procesos de gasificación.*

6. Conclusiones y recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos en las diferentes pruebas, se puede evidenciar que el proceso de gasificación alcanzó un desempeño adecuado, aunque no óptimo. Esto se refleja en la elevada formación de alquitranes y en la obtención de un poder calorífico inferior aceptable. Cabe destacar que las variables de operación desempeñan un papel determinante en la eficiencia del proceso; sin embargo, la falta de control preciso sobre estas variables, junto con la limitada capacidad del sistema de limpieza de gas, impidió alcanzar las condiciones ideales para la producción eficiente de energía eléctrica a partir del gas combustible generado.

Con base lo anterior se optó por realizar modificaciones en el sistema VERANO I. En varios artículos se reportarán diagramas de proceso para gasificadores *Downdraft*, en los cuales se evidencia un patrón en el sistema de limpieza, en los cuales se incluyen *scrubbers*, filtros y un sistema de succión de aire para suministrar el flujo a través del gasificador (Aguado, 2023), otro ejemplo de esta configuración se presenta en la Figura 12.

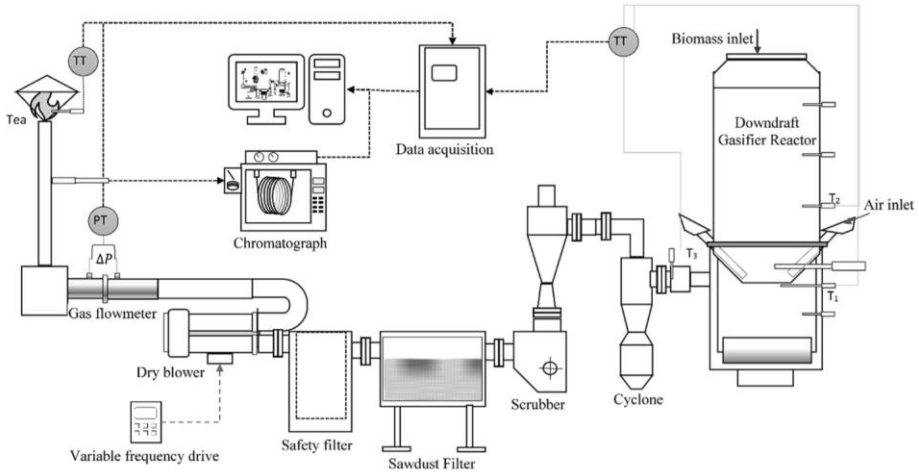


Figura 12. *Sistema de gasificación de la UPB sede Montería (Gómez, 2021).*

A partir de lo anterior, se planteará una propuesta conceptual para los equipos de limpieza del gas a la salida, tomando como base lo reportado en la literatura. Para los gasificadores tipo *Downdraft* se suele emplear la configuración (Asudullah, 2014).



Figura 13. *Configuración del sistema de limpieza de SynGas (Asudullah, 2014).*

Sin embargo, debido a las limitaciones presupuestales y al alto costo operativo de un *wet scrubber*, se opta por proponer la instalación de un tanque burbujeador, el cual resulta más sencillo de construir e integrar al sistema VERANO I. Aunque el principio de transferencia de masa es similar, la literatura reconoce que el *scrubber* alcanza una mayor eficiencia en la limpieza del gas (Bianchini, 2016). Adicionalmente, se incluye la propuesta de un sistema de remoción de condensados a la salida del burbujeador, que funcionaría como un tanque *flash*, permitiendo eliminar la mayor cantidad posible de agua bajo las condiciones de operación. Con el fin de proteger el *blower* encargado de la succión, se recomienda incorporar una trampa de humedad con sílica gel, que adsorba la humedad residual a la salida del *flash*.

De forma complementaria, se plantea el uso de un generador de vapor sobrecalentado, que permitiría realizar gasificaciones con vapor, disminuyendo la fracción de nitrógeno en el *SynGas* y aumentando su poder calorífico mediante una mayor producción de H_2. Según lo anterior se realiza un nuevo esquema del gasificador y se presenta en la Figura 14.

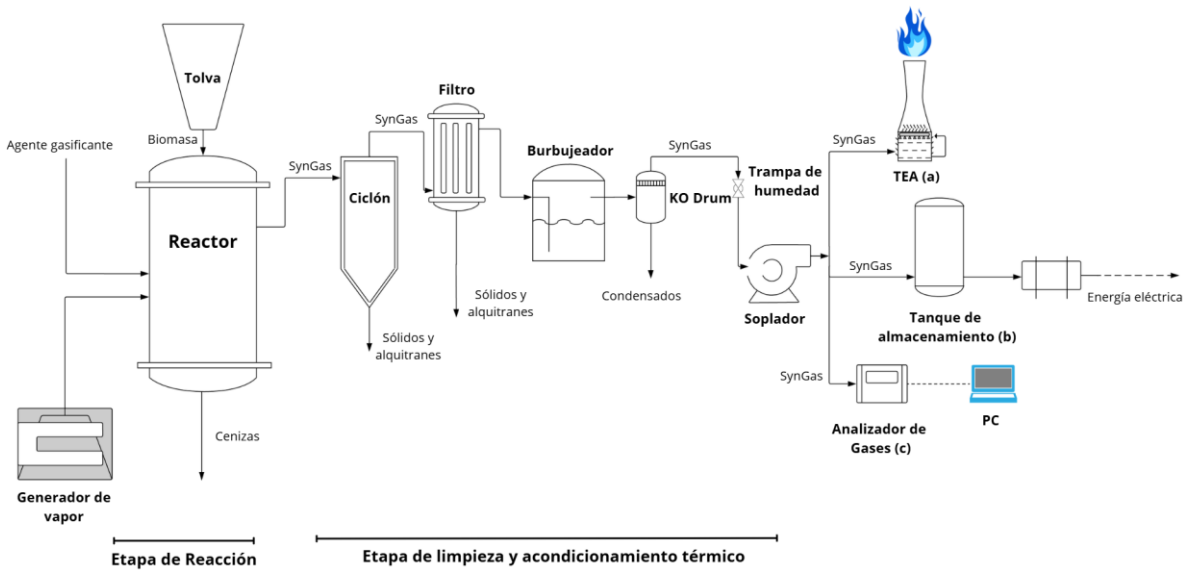


Figura 14. *Propuesta del nuevo sistema de gasificación VERANO I.*

Con la implementación del sistema mejorado se espera obtener una mejor eficiencia en el proceso lo que significa un gas de mayor calidad, lo que abrirá nuevas posibilidades para la investigación en gasificación de biomasa. Este nuevo esquema permitirá realizar diseños experimentales más robustos, incorporando un mayor número de variables de proceso, explorando diferentes biomasas y agentes gasificantes.

Referencias

Aguado, R., Escamez, A., Jurado, F., & Vera, D. (2023). Experimental assessment of a pilot-scale gasification plant fueled with olive pomace pellets for combined power, heat and biochar production. *Fuel*, *344*, 128127.

Asadullah, M. (2014). Biomass gasification gas cleaning for downstream applications: A comparative critical review. *Renewable and sustainable energy reviews*, *40*, 118-132.

Basu, P. (2018). Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory. Academic press.

Bianchini, A., Cento, F., Golfera, L., Pellegrini, M., & Saccani, C. (2016). Performance analysis of different scrubber systems for removal of particulate emissions from a small size biomass boiler. *Biomass and Bioenergy*, *92*, 31-39.

Gai, C., & Dong, Y. (2012). Experimental study on non-woody biomass gasification in a downdraft gasifier. *International Journal of hydrogen energy*, *37*(6), 4935-4944.

García Velásquez, C. A. (2016). *Hydrogen production through gasification and dark fermentation* (Doctoral dissertation)

Gomez, R. D., Palacio, M., Arango, J. F., Avila, A. E., & Mendoza, J. M. (2021). Evaluation of the energy generation potential by an experimental characterization of residual biomass blends from Córdoba, Colombia in a downdraft gasifier. *Waste Management*, *120*, 522-529.

Inamuddin, A., Asiri, A., & Suvardhan, K. (2019). Green sustainable process for chemical and environmental engineering and science. Amsterdam, NL: Elsevier.

Parathesi, M., Winsly, B. W., & Vincent, C. J. S. (2025). Char reduction and producer gas quality enrichment of rice husk by co-gasifying tyre waste in downdraft gasifier. *Fuel*, *390*, 134744.

Pérez, J. F., Benjumea, P. N., & Melgar, A. (2015). Sensitivity analysis of a biomass gasification model in fixed bed downdraft reactors: Effect of model and process parameters on reaction front. *Biomass and bioenergy*, *83*, 403-421.

Rabea, K., Bakry, A. I., Khalil, A., El-Fakharany, M. K., & Kadous, M. (2021). Real-time performance investigation of a downdraft gasifier fueled by cotton stalks in a batch-mode operation. *Fuel*, *300*, 120976.

Ramos-Carmona, S., Pérez, J. F., Pelaez-Samaniego, M. R., Barrera, R., & Garcia-Perez, M. (2017). Effect of torrefaction temperature on properties of Patula pine. *Maderas. Ciencia y tecnología*, *19*(1), 39-50.

Reed, T. B., & Das, A. (1988). Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems. Biomass Energy Foundation.

Yoon, S. J., Son, Y. I., Kim, Y. K., & Lee, J. G. (2012). Gasification and power generation characteristics of rice husk and rice husk pellet using a downdraft fixed-bed gasifier. *Renewable Energy*, *42*, 163-167.

Anexos

Anexos 1.

Códigos para el análisis.

Temperaturas.

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from google.colab import files

# Subir el archivo manualmente desde tu PC
uploaded = files.upload()  # Te pedirá seleccionar el archivo desde tu PC

# Función para agrupar los datos
def TransData(datos, tam_grupo=60):
    n = len(datos)
    num_grupos = n // tam_grupo  # Número de grupos completos
    datos_agrupados = [np.nanmean(datos[i*tam_grupo:(i + 1)*tam_grupo]) for i
in range(num_grupos)]

    # Si hay datos sobrantes
    if n % tam_grupo != 0:
        datos_agrupados.append(np.nanmean(datos[num_grupos*tam_grupo:]))

    return np.array(datos_agrupados)

# Leer archivo Excel (asegúrate de que el nombre sea exactamente igual)
exper = pd.read_excel("Datos Gasificador 220725.xlsx", header=0,
usecols="C:K")

# Extraer datos
TI01 = np.array(exper.loc[:, "TI01"])
TI02 = np.array(exper.loc[:, "TI02"])
TI03 = np.array(exper.loc[:, "TI03"])
TI04 = np.array(exper.loc[:, "TI04"])
Flujo = np.array(exper.loc[:, "FC02"])

# Transformar datos por agrupación
TI01 = TransData(TI01)
TI02 = TransData(TI02)
TI03 = TransData(TI03)
TI04 = TransData(TI04)
Flujo = TransData(Flujo)

# Crear eje de tiempo
Time = np.linspace(1, len(TI01), len(TI01))

# Ajustar tamaño de fuente global
```

```
plt.rcParams.update({'font.size': 14}) # Aumenté el tamaño de fuente a 14

# Gráfico de temperaturas
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(Time, TI01, color='gold', label='TI01', linewidth=2)
plt.plot(Time, TI02, color='red', label='TI02', linewidth=2)
plt.plot(Time, TI03, color='darkorange', label='TI03', linewidth=2)
plt.plot(Time, TI04, color='gray', label='TI04', linewidth=2)
plt.xlabel("Tiempo [min]")
plt.ylabel("Temperatura [°C]")
plt.title("Perfiles de Temperatura")
plt.legend(loc='lower right') # Cambiar la posición de la leyenda
plt.grid(True)
plt.savefig("Graph_Temperatures_.png", dpi=600)
plt.show()

#files.download("Graph_Temperatures_.png")

# Gráfico de flujo
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.scatter(Time, Flujo, color='black', label='FC02')
plt.xlabel("Time [min]")
plt.ylabel("Flow [Kg/h]")
plt.title("Flow of Air")
plt.legend(loc='lower right') # Cambiar la posición de la leyenda
plt.grid(True)
plt.savefig("Graph_Flow.png", dpi=600)
plt.show()

#files.download("Graph_Flow.png")
```

Composicones.

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from google.colab import files

# Subir el documento para gráficar
uploaded = files.upload()

# Cargar datos
exper = pd.read_excel("DATOS ANALIZADOR 020525.xlsx", header=0, usecols="A:G")
CO = np.array(exper["CO"])
CO2 = np.array(exper["CO2"])
CH4 = np.array(exper["CH4"])
H2 = np.array(exper["H2"])
O2 = np.array(exper["O2"])
N2 = 100 - CO - CO2 - CH4 - H2 - O2

# LHV = np.array(exper["LHV"])
```

```
# Calcular el promedio de cada gas usando el DataFrame y crear un DataFrame
con los promedios
promGASES_df = exper[["CO", "CO2", "CH4", "H2",
"O2"]].mean().to_frame(name="Promedio")

# Calcular LHV usando la fórmula proporcionada
LHV = (12.62 * CO + 35.818 * CH4 + 10.77 * H2)/100 # MJ/m3
LHV = LHV*1.2881879 # MJ/Nm3
LHVprom = np.mean(LHV)

# Agregar el promedio de LHV al DataFrame de promedios con las unidades
promGASES_df.loc['LHV [MJ/m³]'] = LHVprom

# Mostrar los promedios en una tabla
print("Promedios de los gases:")
display(promGASES_df)

Time = np.linspace(1, len(CO), len(CO))

#x = [120, 120]
#y = [0, 18]

# Crear figura y primer eje (composición de gases)
fig, ax1 = plt.subplots(figsize=(10, 6))

# Ajustar tamaño de fuente general
plt.rcParams.update({'font.size': 12})


# Graficar gases con colores ajustados
#plt.plot(x, y, 'c', linestyle='--')
plt.scatter(Time, CO, s=10, color='forestgreen', label='CO')
plt.scatter(Time, CO2, s=10 ,color='lightsteelblue', label='CO2')
plt.scatter(Time, CH4, s=10 ,color='cornflowerblue', label='CH4')
plt.scatter(Time, H2, s=10 ,color='springgreen', label='H2')
plt.scatter(Time, O2, s=10 ,color='royalblue', label='O2')

ax1.set_xlabel("Tiempo [min]")
ax1.set_ylabel("concentración del gas [%]", color='black')
ax1.tick_params(axis='y', labelcolor='black')
ax1.set_xlim(0, None)
ax1.set_ylim(0, 18)

# Segundo eje para LHV
ax2 = ax1.twinx()
ax2.plot(Time, LHV, color='red', label='LHV', linewidth=2.5, linestyle='-')
ax2.set_ylabel("LHV [MJ/Nm³]", color='red')
ax2.tick_params(axis='y', labelcolor='red')
ax2.set_ylim(0, None)

# Título y grilla
fig.suptitle("Concetración de gases y poder calorífico inferior")
```

```
ax1.grid(True)

# Leyenda combinada
lines1, labels1 = ax1.get_legend_handles_labels()
lines2, labels2 = ax2.get_legend_handles_labels()
ax1.legend(lines1 + lines2, labels1 + labels2, loc='upper center',
bbox_to_anchor=(0.5, 1.08), ncol=len(labels1+labels2))

# Guardar imagen
plt.savefig("Graph_Concentration_and_LHV_v2.png", dpi=600)
plt.show()

print(N2)
#files.download("Graph_Concentration_and_LHV_v2.png")
```

Balances de biomasa y eficiencias.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd

# COMPOSICIONES ANALIZADOR DE GASES.
def LHV_gas(CO, CH4, H2):
  LHV = 10.79*H2 + 12.636*CO + 35.82*CH4
  return LHV

CO = 0.1583
CO2 = 0.2006
CH4 = 0.0247
H2 = 0.1707
O2 = 0.0052
N2 = 1 - CO - CO2 - CH4 - H2 - O2
print(N2)

LHV_gas_value = LHV_gas(CO, CH4, H2)
print(LHV_gas_value)

### FUNCIONES ###

def PC_seco(C, H, O, N, S):

    HHV = 349.1*C + 1178.3*H + 100.5*S - 103.4*O - 15.1*N - 21.1*ASH
    LHV = HHV - 2260*(9*H/100 - Moisture/100)
    return [HHV, LHV]

def PC_hum(HHV, LHV, Hum):

    hfg = 2500 #kJ/kg water
    PChum = PC_seco(C, H, O, N, S)[1]*(1 - Hum/100) - Hum*hfg/100
    return PChum

def AC(C, H, O, N, S, Hum):
```

```
  Air_Fuel = 0.1153*C + 0.3434*(H - O/8) + 0.043*S
  Air_Fuel_Hum = Air_Fuel*(1 - Hum/100)
  Air_Fuel_Real = ER*Air_Fuel
  Air_Fuel_Real_Hum = (1 - Hum/100)*Air_Fuel_Real
  return [Air_Fuel_Real, Air_Fuel_Real_Hum]

### VARIABLES DE ENTRADA ###
m_punto = 8 # kg/h

C = 50.54 # %
H = 7.08 # %
O = 41.11 # %
N = 0.7 # %
S = 0.57 # %

ASH = 0 # %

Moisture = 8
ER = 0.3 # Asumido
air_flow = m_punto*AC(C, H, O, N, S, Moisture)[1]

print('')
print('Los poderes caloríficos son los siguientes:')
print('El HHV y LHV seco es de:', round(PC_seco(C, H, O, N, S)[0], 2), 'y',
round(PC_seco(C, H, O, N, S)[1], 2), 'kJ/kg')
print('El poder calorífico húmedo es de:', round(PC_hum(PC_seco(C, H, O, N,
S)[0], PC_seco(C, H, O, N, S)[1], Moisture), 2), 'kJ/kg')
print('')
print('La relación Aire/Combustible seco y húmedo es de:', round(AC(C, H, O,
N, S, Moisture)[0], 3),'y', round(AC(C, H, O, N, S, Moisture)[1], 3))
print('kg air/kg de biomasa')
print('')
print('El flujo de aire requirido para gasificar es de:', round(air_flow, 3),
'kg/h')


def vg(Q, N2, m_b):
  Vg = (Q*79)/(N2*m_b)
  return Vg

def CGE(LHV_gas, LHV_b, Vg):
  Vg = vg(Q, N2, m_b)
  CGE = (LHV_gas*Vg/LHV_b)*100
  return CGE

def CCE(CO, CO2, CH4, C2H6, C, Vg):
  Vg = vg(Q, N2, m_b)
  CCE = (12*(CO + CO2 + CH4 + C2H6))/(22.4*C)*Vg*100
  return CCE

# VARIABLES
```

```
m_b = m_punto
Q = air_flow/rho_air
print(round(Q, 3), 'm3/h')
LHV_b = LHV_hum/1000
print(round(LHV_b, 3), 'MJ/kg')

CGE_value = CGE(LHV_gas_value, LHV_b, vg(Q, N2, m_b))
print(round(CGE_value, 3), '%')

CCE_value = CCE(CO, CO2, CH4, 0, C, vg(Q, N2, m_b))
print(round(CCE_value, 3), '%')
```