

Valoración energética de la biomasa residual para una economía circular en sectores agrícolas estratégicos de la región Pacífico colombiana

Diana Castro-Mur¹, Daniel Guerrero-Cerón², Diego Yepes-Maya³

¹Centro de Desarrollo Tecnológico CREATIC, Colombia. Email: diana.castro@cdtcreatic.com

²Universidad del Cauca, Colombia. Email: daniguerrero@unicauca.edu.co

³Universidad Federal de Itajubá, Brasil. Email: diegoyepes@unifei.edu.br

Resumen

Este estudio se enfocó en el análisis exhaustivo del potencial energético de la biomasa agrícola residual en la región Pacífico colombiana, mediante un enfoque metodológico que comprendió la identificación, caracterización y modelado de diversas fuentes. Inicialmente, se creó un inventario detallado de cultivos, seleccionando residuos con base en su disponibilidad, poder calorífico y relevancia agroindustrial. Se realizaron análisis fisicoquímicos para determinar la composición y las propiedades energéticas de las biomásas. Posteriormente, se desarrolló un modelo matemático utilizando MATLAB y el simulador de procesos Simulink, fundamentándose en hipótesis de producción constante de biomasa y optimización tecnológica para estimar el potencial teórico y técnico, y evaluar la viabilidad de conversión a través de la tecnología de gasificación y de la tecnología de combustión ciclo vapor. Este enfoque permitió la identificación de estrategias óptimas para el aprovechamiento de la biomasa residual en el contexto de la economía circular y la gestión en la disposición final de residuos.

Palabras clave: Biomasa residual; energía renovable; economía circular; tecnologías de conversión, gasificación; MATLAB.

Abstract

This study focused on a comprehensive analysis of the energy potential of agricultural residual biomass in the Colombian Pacific region, using a methodological approach that included the identification, characterization, and modeling of various sources. Initially, a detailed inventory of crops was created, selecting residues based on their availability, calorific value, and agro-industrial relevance. Physicochemical analyses were conducted to determine the composition and energy properties of the biomasses. Subsequently, a mathematical model was developed using MATLAB and the Simulink process simulator, based on hypotheses of constant biomass production and technological optimization, to estimate the theoretical and technical potential and evaluate the feasibility of conversion through gasification and steam cycle combustion technologies. This approach allowed the identification of optimal strategies for the utilization of residual biomass in the context of the circular economy and waste management.

Keywords: Residual biomass; renewable energy; circular economy; conversion technologies; gasification; MATLAB.

1. Introducción

El nexo "Residuos-energía" se destaca como un componente esencial de la economía circular, debido a su capacidad para abordar una variedad de problemas ambientales. Estos incluyen la gestión de residuos, la generación de energía y la reducción de la contaminación, lo que lo convierte en un factor clave para el desarrollo sostenible y su alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en términos ambientales, sociales, económicos, de mercado y políticos. La biomasa, como una fuente de energía renovable, puede cubrir hasta el 12 % de la demanda energética global y desempeña un papel crucial en el suministro de energía hacia el 2050, así como en el ciclo global del carbono [1], [2], [3], [4].

El sector agrícola a nivel mundial presenta una posición significativa en la economía, pues contribuye con el 33 % del PIB mundial. De la misma manera, emplea al 26,81 % de la población global y utiliza el 38,14 % de la tierra para fines agrícolas. La biomasa residual, compuesta por residuos de campos de cultivo, desechos animales y efluentes agroindustriales, es un componente significativo de este sector. Anualmente, se producen más de tres mil millones de toneladas de residuos agrícolas en todo el mundo, representando un desafío considerable para los agricultores, especialmente en términos de los costos y la mano de obra necesarios para su manejo adecuado [1].

De acuerdo con el Ministerio de Agricultura, Colombia, un país tropical, se caracteriza por su abundante tierra agrícola, donde el sector agropecuario contribuye entre el 6 % y el 8 % al PIB nacional y es responsable de cerca del 15 % del empleo en el país. Esto hace que la agricultura y las actividades conexas sean prioritarias para las autoridades gubernamentales, incluyendo la gestión adecuada de residuos para conservar los recursos naturales y los ecosistemas colombianos. Además, la geografía montañosa colombiana facilita variaciones climáticas suficientes que favorecen el desarrollo de una amplia variedad de cultivos, comprendiendo desde plátanos y caña de azúcar hasta cebada, arroz, cacao y café. Estos cultivos generan grandes cantidades de residuos agrícolas, que comprenden biomasa vegetal que puede ser utilizada en diversos procesos de generación de energía a través de procesos de transformación [5].

En relación con los cultivos, la región Pacífico colombiana, en los departamentos de Cauca y Nariño, la variabilidad en la aptitud del suelo también indica la importancia de la promoción de un uso sostenible y eficiente de los recursos territoriales. De acuerdo con estadísticas del Sistema de Información para la Planificación Rural Agropecuaria (SIPRA), en el departamento de Nariño, especialmente en el municipio de San

Andrés de Tumaco, de las 363.501 hectáreas aptas para cultivo, 95.093 hectáreas presentan aptitud para el cultivo de cacao. Para el departamento del Cauca, específicamente en el municipio de Popayán, zona rural, tanto para el cultivo de café como el de caña panelera, presenta un alto potencial para el cultivo de estas dos especies, representando el 66.1 % y el 45.6 % respectivamente del área total con potencial para cultivos agrícolas (UPME, 2023).

El potencial energético de la biomasa residual en Colombia, en el sector agrícola, es de 331.711 TJ/año, siendo los cultivos permanentes los de mayor potencial con 283 mil TJ/año. Para los departamentos objeto de estudio en la región Pacífico, como el Cauca y Nariño, su potencial energético en biomasa residual es significativo, representando 26.690 TJ/año y 12.207 TJ/año respectivamente, en cultivos principalmente permanentes, entre ellos café, cacao y caña panelera [6].

La obtención de energía de la biomasa residual se divide normalmente en tres rutas tecnológicas principales, térmica, química y bioquímica. Aunque también pueden agruparse en solo dos rutas, termoquímica y bioquímica. La biomasa lignocelulósica es el principal sustrato de biomasa en términos de cantidad y viabilidad económica y representa hasta el 80 % de los productos útiles entre bioenergía y subproductos. La biomasa de residuos de cultivos representa el 27 %–80 % del total de la biomasa lignocelulósica disponible [2]. Los métodos termoquímicos son una de las posibilidades para procesar la biomasa residual, ya que se refieren a metodologías térmicas capaces de descomponer materiales carbonosos en sus moléculas constituyentes, rompiendo los enlaces químicos y recuperando la energía que encierran. En este sentido, es posible establecer las llamadas técnicas de "residuos a energía" (WtE), que convierten la materia prima inicial en energía. Una de ellas es la gasificación, considerada una opción prometedora que muestra altas eficiencias y un proceso de conversión más limpio, produciendo un gas altamente rentable (sintético) compuesto por CO, CO₂, H₂ e hidrocarburos ligeros [3].

Este trabajo tiene como objetivo evaluar la valorización energética a partir de biomasa como estrategia de sostenibilidad y economía circular para biomasa residual agrícola producida en tres cultivos específicos: café, cacao y caña panelera, de los departamentos del Cauca y Nariño en la región Pacífico colombiana. Así, la recuperación energética se estudia a través del proceso de gasificación de la biomasa, cuyo producto es un precursor energético considerado como materia prima para la generación de electricidad a través de un modelo de sistema de combustión ciclo vapor. Lo anterior esta basado en simulaciones utilizando MATLAB y Simulink, para la evaluación

del comportamiento termodinámico de fuentes de energía bioenergética.

2. Método(s).

2.1. Recolección e interpretación de la información

En el proceso de recolección de información, se realizó un acercamiento y reconocimiento a las entidades, agremiaciones y empresas relacionadas con la producción de biomasa residual. Una vez obtenida la información, se determinaron los potenciales energéticos de cada tipo de biomasa. Dadas las características físicas de la biomasa según su origen, en este caso del sector agrícola, se implementó un proceso termoquímico para la extracción de energía.

La biomasa residual considerada para el sector agrícola fue seleccionada teniendo en cuenta la disponibilidad en la región Pacífica de Colombia, la producción de estos cultivos y su viabilidad energética. En la Tabla 1 se presentan los datos de las plantaciones objeto de estudio, en los departamentos de Nariño y Cauca, para los municipios de San Andrés de Tumaco y Popayán, respectivamente. Los datos entregan información clave sobre la superficie cultivada, la producción y el rendimiento de los cultivos de cacao, caña panelera y café en el año 2023. Estos datos permiten realizar un análisis del potencial energético de cada cultivo a partir de sus residuos.

Cultivo	Área plantada [Ha]	Producción [t]	Rendimiento [t/Ha]
Cacao	15.210,2	7.655,202	0,51
Caña Panelera	613	26.928	44
Café	3.407,32	2.732,92	0,93

Tabla 1. Datos según la plantación - año 2023.

Fuente: Elaboración propia basada en [7].

La Tabla 2 proporciona una cuantificación detallada del factor de residuos para los cultivos estudiados, diferenciados por tipo y origen del residuo. Los cultivos analizados incluyen caña panelera, café y cacao. Cada uno de estos cultivos genera varios tipos de residuos, clasificados como residuos agrícolas industriales (RAI) o residuos agrícolas de cosecha (RAC). El factor de residuo se expresa como la cantidad de residuos generados por tonelada de producto principal (t residuos/t producto principal). Esta información es esencial para evaluar el potencial energético de cada tipo de biomasa residual, considerando sus características físicas y su origen, lo cual permite implementar procesos eficientes de valorización energética.

Cultivo	Tipo de biomasa residual	Origen de biomasa residual	Factor de residuo [t residuo/t producto]	Factor de residuo seco [t residuo seco/t residuo hum]
Cacao	Cáscaras	RAC	0,12	0,168
Caña Panelera	Bagazo	RAC	2,5	0,874
Café	Cascarilla	RAI	0,205	0,168

Tabla 2. Tipo de residuo y factor de residuo de cada cultivo.

Fuente: Elaboración propia basada en [8], [9].

2.2. Biomasa residual

En el presente estudio se compararon tres tipos de biomasa residual de diferentes orígenes, integrando cascarilla de café (CF), bagazo de caña panelera (BP) y cáscara de cacao (CC). Las muestras se recogieron respectivamente de: una planta de trilla de café ubicada en el municipio de Popayán, departamento del Cauca; un montaje panelero localizado en la vereda El Tablón, municipio de Popayán, departamento del Cauca; un cultivo productivo de cacao, ubicado en la vereda La Quinta del río Rosario del municipio de San Andrés de Tumaco, departamento de Nariño.

El contenido inicial de humedad para las muestras de CF, BP y CC era de: 9,18 %, 51,09 % y 81,9 %, respectivamente. Esta biomasa residual se secó en un horno a 85 °C durante 25 horas, alcanzando una humedad final de 3,84 % para CF, 4,14 % para BP y 3,94 % para CC. Posteriormente, las muestras se molieron utilizando un molino electrónico, pasándolas a través de un tamiz con malla número 35 (500 µm), para optimizar su caracterización.

2.3. Datos experimentales

2.3.1. Análisis próximo, análisis último y de Poder Calorífico.

La determinación de propiedades físico-químicas de los combustibles incluyó: análisis último (determinación de CHNS/O), poder calorífico superior (PCS) y análisis próximo (humedad, volátiles, carbono fijo y cenizas). El análisis próximo determinó la fracción de carbono fijo (FC), la fracción de volátiles (VM), el contenido de humedad (MC) y el contenido de cenizas (A), y se realizó conforme al método ASTM D5142, proporcionando una caracterización completa de los distintos tipos de biomasa residual: cascarilla de café, bagazo de caña panelera y cáscara de cacao. Adicionalmente, el análisis último determinó la composición elemental de la biomasa en términos de nitrógeno (N), carbono (C), azufre (S), hidrógeno (H) y oxígeno (O), para evaluar su idoneidad como combustible en procesos de gasificación. En la Tabla 3 se pueden visualizar los

resultados de los análisis experimentales para cada biomasa residual objeto de estudio.

Para los análisis mencionados, se utilizaron equipos especializados, incluyendo la bomba calorimétrica (IKA WERKE C2000 Control) para la determinación del poder calorífico, y el analizador elemental (Perkin Elmer CHNS/O 2400 Series II) para la composición elemental. Estos datos son fundamentales para la simulación y optimización del proceso de gasificación, permitiendo un entendimiento profundo del comportamiento de cada tipo de biomasa bajo condiciones de operación específicas.

Biomasa	Análisis próximo [%]		Análisis Elemental [%]	
Cascari-lla de café	Base seca		Base seca	
	FC	18,78	C	37,30
	VM	75,49	H	4,08
	Ash	1,51	O	42,14
	MC	4,30	N	1,36
	PCS [MJ/kg]	18,96	S	0,08
Bagazo de caña panelera	Base seca		Base seca	
	FC	11,82	C	43,59
	VM	79,76	H	5,26
	Ash	0,98	O	38,37
	MC	7,45	N	0,14
	PCS [MJ/kg]	18,39	S	0,04
Cáscara de cacao	Base seca		Base seca	
	FC	21,49	C	48,70
	VM	65,27	H	0,75
	Ash	8,98	O	48,39
	MC	4,25	N	1,19
	PCS [MJ/kg]	15,15	S	0,97

Tabla 3. Análisis próximo, elemental y calorífico para las biomásas residuales CF, BP y CC.

Fuente: elaboración propia.

2.4 Potencial energético

La Figura 1 ilustra la metodología de evaluación del potencial energético de la biomasa agrícola residual en una región específica. Este proceso comienza con la identificación de los principales productos agrícolas y considera factores agronómicos como el área cultivada y el factor de biomasa para determinar su disponibilidad, esencial para la generación energética. Además, se consideran las propiedades de la biomasa, su composición y contenido de humedad, y los requisitos tecnológicos para convertirla eficientemente en energía. A partir de esta información se estiman tanto el potencial energético teórico como el técnico de la biomasa seca disponible.

Para estimar el potencial energético de la biomasa residual agrícola, se desarrolló un modelo matemático que consideró las variables más significativas involucradas [8]. Se detallaron las interrelaciones y comportamientos de estas variables, ajustando las unidades necesarias para calcular con precisión el potencial energético de la biomasa según las condiciones específicas del lugar de su recolección.

El potencial energético teórico de la biomasa residual se determinó a partir de la relación entre la cantidad de biomasa producida y la energía total liberada, medida en términos del Poder Calorífico Inferior (PCI). Este valor representa la máxima cantidad de energía que se podría obtener si toda la biomasa residual disponible se convirtiera en energía de manera eficiente, sin pérdidas significativas. A continuación, se presenta la relación existente entre estas variables y el modelo matemático aproximado utilizado para su cálculo.

$$Q_{ij} = B_{ij} \cdot PCI_j \quad (1)$$

El potencial energético técnico, donde se tienen en cuenta las restricciones tecnológicas, económicas y ambientales que afectan la producción y utilización de energía.

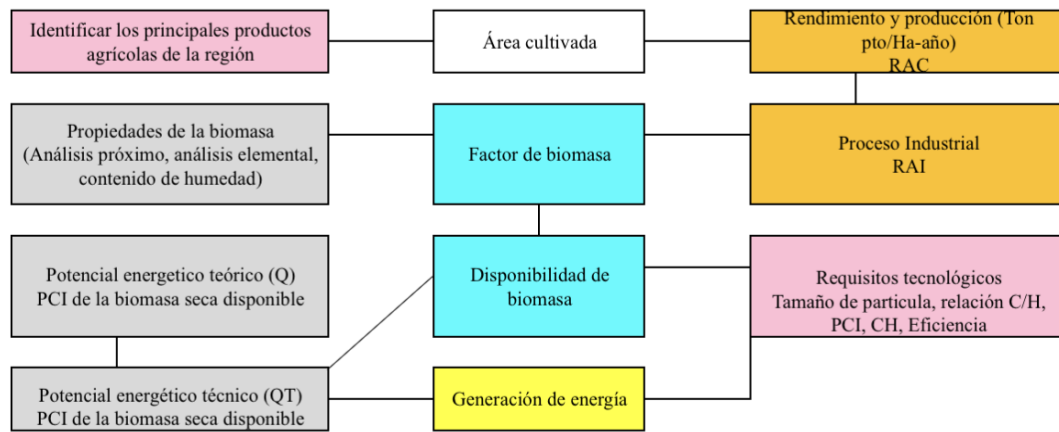


Figura 1. Metodología del potencial energético de la biomasa residual. Fuente: Elaboración propia basada en: [7].

$$QT_{ij} = Q_{ij} \cdot \eta \quad (2)$$

Dónde:

i : Cultivo de referencia,

j : Tipo de biomasa residual generada en su producción,

B_{ij} : Cantidad de biomasa residual producida,

PCI_j : Poder calorífico inferior del tipo de biomasa residual.

η : Eficiencia de la transformación de biomasa residual.

2.1.2. Modelo matemático para la estimación del potencial energético

Se planteó un modelo matemático para estimar el potencial energético teórico (Q_{ij}) y técnico (QT_{ij}) de la biomasa residual agrícola, teniendo en cuenta la extracción de energía a través de procesos termoquímicos. Esto implicó considerar inicialmente el área total cultivada del producto (A), el rendimiento del cultivo (R_C) y las fracciones de la producción total que se convierten en biomasa residual (F_r y Y_{rs}).

$$B_{ij} = A \cdot R_C \cdot F_r \cdot Y_{rs} \quad (3)$$

Lo anterior, para obtener la cantidad de biomasa residual producida.

Posteriormente, se considera el cálculo de la cantidad de energía química contenida en cada biomasa residual, dada en términos de energía liberada [MJ] por cantidad de masa [kg]. En la ecuación 4 se

especifica el cálculo del PCI, a partir del Poder Calorífico Superior (PCS) obtenido en análisis experimentales, esenciales para la valoración del potencial energético de las biomásas.

$$PCI = PCS - (9 \cdot (H - O) + W) \quad (4)$$

Dónde:

PCS : Poder Calorífico Superior de la biomasa residual.

PCI : Poder Calorífico Inferior de la biomasa residual.

H : Porcentaje de hidrógeno en la biomasa.

O : Porcentaje de oxígeno en la biomasa.

W : Porcentaje de humedad de la biomasa residual.

Después de determinar la cantidad de biomasa residual agrícola y sus poderes caloríficos, el potencial energético de la biomasa residual para los diferentes cultivos en diversos territorios de la región Pacífico se define mediante las ecuaciones 1 y 2. El modelo matemático fue simplificado e implementado en MATLAB, proporcionando una herramienta eficiente y precisa para evaluar y maximizar el aprovechamiento energético de la biomasa residual. Esto facilita la planificación y optimización de recursos en la producción de bioenergía. En la Figura 2 se muestra el diagrama de flujo del modelo desarrollado para determinar el potencial energético.

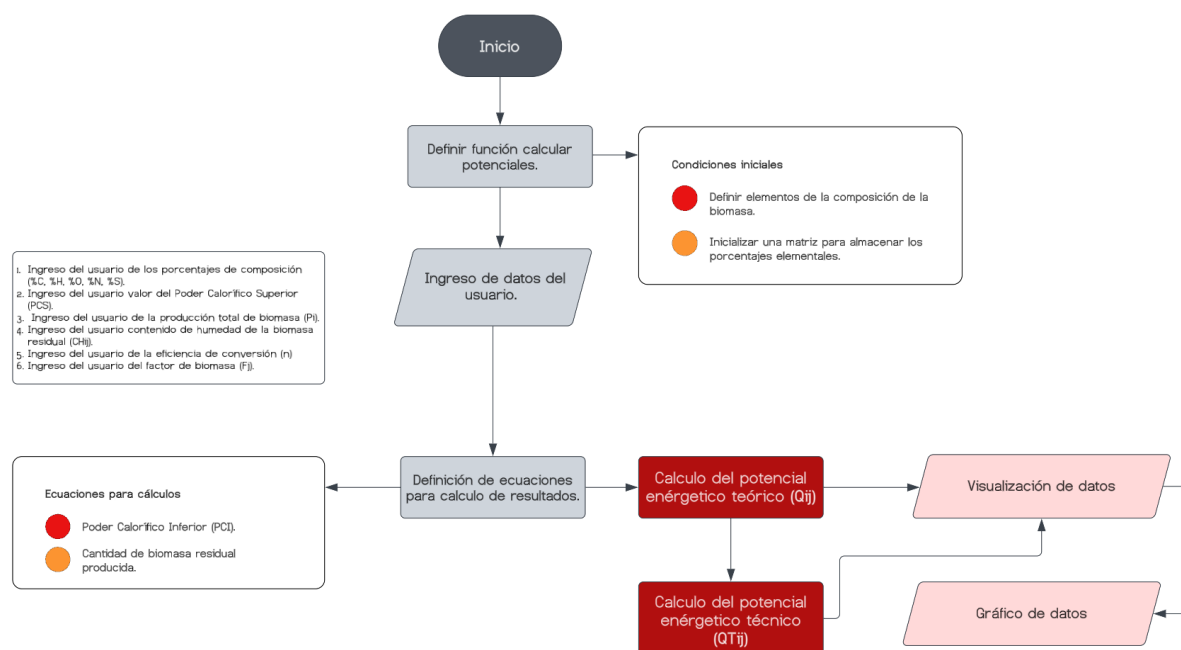


Figura 2. Diagrama de flujo del modelo para determinar el Potencial Energético de la biomasa residual. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 3 representa una simulación de modelos energéticos mediante el uso de Simulink para calcular los potenciales energéticos de la biomasa. El modelo incluye entradas que representan la composición química de la biomasa (carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno), así como parámetros adicionales como el contenido de agua, la cantidad de biomasa y factores de eficiencia. Mediante un bloque central de cálculo, se derivan diversas salidas que incluyen el PCS, PCI y los potenciales teórico y técnico. Estos cálculos permiten una evaluación detallada del potencial energético de cada biomasa.

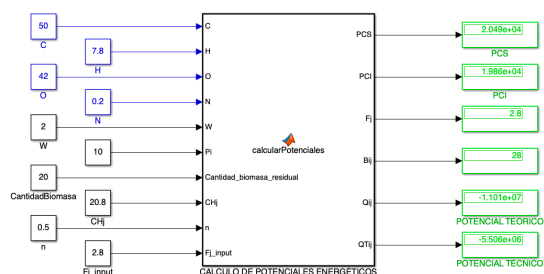


Figura 3. Diagrama de potencial energético de la biomasa residual en Simulink. Fuente: Elaboración propia.

2.3 Formulación del modelo de equilibrio termodinámico y método de solución.

Se elaboró un modelo de gasificación basado en principios de equilibrio termodinámico

estequiométrico, específicamente diseñado para operar en un gasificador de lecho fijo downdraft. Este modelo tomó en cuenta las características únicas de la biomasa residual y la dinámica operativa del gasificador. Se realizaron balances de masa y energía, enriquecidos con ajustes empíricos fundamentados en observaciones experimentales. El diseño del modelo se sustentó en información detallada obtenida de documentos científicos relevantes de [10], [11], [12], [13], [14], [15], lo que facilitó la integración de conocimientos teóricos y prácticos. Esta integración estratégica aprovechó metodologías previamente validadas y adaptaciones empíricas que reflejan avances contemporáneos en este campo de estudio.

2.3.1 Suposiciones que sustentan el modelo.

Las suposiciones que fundamentaron el modelo de gasificación incluyeron que el gasificador operaba bajo condiciones estables, asegurando un equilibrio en el que la temperatura, presión y composición no variaban con el tiempo. Se presupuso un tiempo de residencia infinito, permitiendo que los materiales alcanzaran un equilibrio químico completo. El nitrógeno fue considerado inerte, no interviniendo en las reacciones químicas. El proceso se modeló como adiabático, es decir, sin intercambio de calor con el entorno. Además, se consideró que la contribución energética del carbón y la ceniza era despreciable. La presión total se mantuvo constante, aunque la

presión parcial de los componentes del gas variaba en función de su equilibrio químico. Los reactivos comenzaban a temperatura estándar, mientras que la temperatura de los productos, que debía determinarse analíticamente, podía variar.

2.3.2. Configuraciones del modelo.

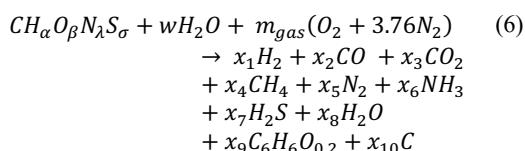
Las constantes y parámetros iniciales del modelo fueron definidos y están detallados en la Tabla 4. Esta tabla proporciona una visualización clara y accesible de estos elementos esenciales, facilitando la comprensión y referencia rápida de los valores fundamentales que rigen el modelo.

Constante/Parámetro	Valor		Unidad	
Constante universal de los gases (R)	8,314		[J/mol*K]	
Temperatura estándar (T ₀)	298,15		[K]	
Presión estándar (P ₀)	101.325		[Pa]	
Masas molares	C	12,01	[kg/mol]	
	H	1,008		
	O	16,00		
	N	14,01		
	S	32,06		
Fracciones de elementos en el aire	O ₂	0,21	N ₂	0,79
Coefficiente de equivalencia (ER)	Rango: 0,20 – 0.40			

Tabla 4. Constantes y parámetros iniciales del modelo.
Fuente: Elaboración propia.

2.3.3 Desarrollo del modelo de equilibrio termodinámico estequiométrico de gasificación de biomasa residual.

El modelo se basa en la siguiente reacción de gasificación de biomasa residual, representada por la ecuación:



Donde:

$\alpha, \beta, \lambda, \delta$: son los coeficientes estequiométricos de carbono, oxígeno, nitrógeno y azufre, respectivamente, en la biomasa.

w: es el número de moles de agua añadida.

m_{gas} : es el número de moles de gas oxidante.

x_1, x_2, \dots, x_{10} : son las fracciones molares de los productos generados.

El modelo se fundamentó en una metodología sistemática y estructurada para analizar y optimizar el proceso de gasificación de biomasa residual. Esta metodología establece una base sólida para comprender el comportamiento de diferentes tipos de biomasa bajo condiciones operativas específicas, facilitando el análisis del proceso. A continuación, se detalla cada etapa del proceso de desarrollo del modelo:

2.3.3.1. Definición de constantes y parámetros Iniciales.

Se inició con la definición de constantes termodinámicas esenciales:

- *Entalpías de formación (hf)*: determinantes para calcular los balances de energía.
- *Poderes Caloríficos Inferiores (LHV)*: importantes en la determinación de la energía disponible en los productos de gasificación.
- *Componentes y elementos*: se definieron un conjunto de componentes químicos relevantes y se especificaron las masas molares de los elementos constituyentes.

2.3.3.2 Ingreso de Datos del Usuario.

Se solicita al usuario proporcionar:

- *Composición elemental de la biomasa*: porcentajes de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre.
- *Contenido de humedad de la biomasa (MC) y Poder Calorífico Inferior (LHV) de la biomasa*. Estos datos fueron esenciales para realizar los cálculos posteriores.

2.3.3.3. Cálculos Preliminares.

Con los datos ingresados, se realizaron varios cálculos preliminares:

- *Número de átomos por átomo de carbono*: para cada elemento, se calcularon los coeficientes estequiométricos (α para hidrógeno, β para oxígeno, λ para nitrógeno, δ para azufre).

$$\alpha = \frac{y_H \cdot M_C}{y_C \cdot M_H} \quad \beta = \frac{y_O \cdot M_C}{y_C \cdot M_O}$$

$$\lambda = \frac{y_N \cdot M_C}{y_C \cdot M_N} \quad \sigma = \frac{y_S \cdot M_C}{y_C \cdot M_S} \quad (7)$$

Donde:

y_C, y_H, y_O, y_N, y_S : Fracción molar de los componentes elementales en la biomasa.

M_C, M_H, M_O, M_N, M_S : Masa molar de los componentes elementales de la biomasa.

• *Masa molar de la biomasa (Mbm)*: calculada en función de la composición elemental.

$$M_{bm} = \frac{M_C}{y_C} \cdot 100\% \quad (8)$$

Donde:

M_C : Masa molar del carbono.

y_C : Fracción molar del carbono.

• *Número de moles de agua por mol de biomasa (w)*: determinado en función del contenido de humedad.

$$w = \frac{M_{bm} \cdot MC}{(2M_H + M_O) \cdot (1 - MC)} \cdot 100\% \quad (9)$$

2.3.3.4. Definición de Matrices para Almacenar Resultados.

Se definieron matrices para almacenar los resultados de las simulaciones. Estas matrices incluyeron:

- *Resultados molares*: cantidades molares de cada componente del syngas.
- *Porcentajes molares*: fracciones molares de cada componente del syngas, calculadas para diferentes rangos del cociente de equivalencia (ER).
- *Rendimiento del syngas y del alquitrán*: valores calculados para diferentes rangos del cociente de equivalencia (ER).

2.3.3.5. Balance de Materia y Energía.

El balance de materia se establece mediante un sistema de ecuaciones no lineales que describen las reacciones de gasificación. Estas ecuaciones integran:

- *Ecuaciones estequiométricas*: para carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre.
- *Ecuaciones de equilibrio químico*: que asegurarán que las reacciones estén en equilibrio.

Se utiliza la función `fsolve` de MATLAB para resolver este sistema de ecuaciones, permitiendo obtener las fracciones molares de cada componente del syngas para diferentes valores de ER.

2.3.3.6. Balance de Energía.

El balance de energía en el sistema se evalúa calculando la entalpía de los componentes del gas de síntesis a diferentes temperaturas de operación.

• *Energía absorbida*: calculada integrando las capacidades caloríficas (C_p) de los componentes desde una temperatura de referencia hasta la temperatura de operación.

$$C_{p,i}(T) = R(A_i + B_i T + C_i T^2 + D_i T^{-2}) \quad (10)$$

Donde:

$C_{p,i}(T)$: Capacidad calorífica a presión constante del componente i como una función de la temperatura (T).

R : Constante universal de los gases ideales (aproximadamente $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$).

A_i, B_i, C_i, D_i : Coeficientes específicos del componente i que se determinan experimentalmente y se utilizan para ajustar la capacidad calorífica en función de la temperatura.

T : Temperatura en kelvin (K).

• *Energía liberada*: determinada a partir de las entalpías de reacción de las reacciones exotérmicas.

$$\Delta H(T) = \sum_i v_i \cdot h_i(T) = 0 \quad (11)$$

Donde:

$\Delta H(T)$: Cambio de entalpía del sistema a una temperatura T .

\sum_i : Sumatoria sobre todos los componentes i del sistema.

v_i : Coeficiente estequiométrico del componente i en la reacción. Este coeficiente es positivo para los productos y negativo para los reactivos.

$h_i(T)$: Entalpía específica del componente i a la temperatura T .

• *Balance energético*: Diferencia entre la energía absorbida y la energía liberada, ajustando las cantidades de reactivos para mantener un equilibrio energético a diferentes temperaturas de operación.

Se graficaron la energía absorbida y liberada, así como el balance energético y las cantidades ajustadas de reactivos necesarias para lograr el equilibrio energético.

2.3.3.7. Cálculo del poder calorífico inferior del Gas y eficiencia de conversión de gasificación.

- *Poder Calorífico Inferior (LHV) del gas de síntesis*: calculado para cada valor de ER, basado en las fracciones molares y los LHV de cada componente.
- *Eficiencia de Conversión de Gasificación (CGE)*: determinada como el ratio del LHV del gas de síntesis al LHV de la biomasa.

2.3.3.7. Resolución del Sistema de Ecuaciones.

La resolución del sistema de ecuaciones se lleva a cabo para cada valor de ER, ajustando los coeficientes estequiométricos y de equilibrio químico hasta que las ecuaciones se satisfacen.

2.3.3.8. Visualización de Resultados.

Se generaron gráficos que muestran:

- *LHV del gas de síntesis*: Calculado para diferentes valores de ER.

$$LHV_{gas} = \frac{1}{N_{gas}} \sum_{i=1}^7 x_i LHV_i \quad (12)$$

Donde:

LHV_{gas} : Poder calorífico inferior del gas de síntesis.
 N_{gas} : Número total de moles del gas de síntesis.
 \sum : Sumatoria sobre los siete componentes principales del gas de síntesis.
 x_i : Fracción molar del componente i en el gas de síntesis.

LHV_i : Poder calorífico inferior del componente i.

- *Eficiencia de conversión (CGE)*: Calculada para diferentes valores de ER.

$$CGE = \frac{LHV_{gas}}{LHV_{bm}} \cdot 100\% \quad (13)$$

Donde:

LHV_{gas} : Poder calorífico inferior del gas de síntesis.
 LHV_{bm} : Poder calorífico inferior de la biomasa.

- *Rendimiento del syngas*: En función del ER.

$$syngas_yield = \frac{N_{gas} \cdot V_m}{M_{bm}} \cdot 100\% \quad (14)$$

Donde:

N_{gas} : Número total de moles del gas de síntesis producido.

V_m : Volumen molar del gas, generalmente a condiciones estándar (22.4 L/mol a 0°C y 1 atm).

M_{bm} : Masa molar de la biomasa.

- *Rendimiento del alquitrán*: En función de ER.

$$tar_yield = 0.812 \exp(-3.81 \cdot ER) \frac{M_{bm}}{M_{tar}} \quad (15)$$

Donde:

$\exp(-3.81 \cdot ER)$: Función exponencial que depende del cociente de equivalencia (ER).

ER : Cociente de equivalencia, que es la relación entre la cantidad de oxígeno disponible y la cantidad de oxígeno estequiométricamente necesaria para la combustión completa de la biomasa.

M_{bm} : Masa molar de la biomasa.

M_{tar} : Masa molar del alquitrán.

2.3.3.9. Cálculo y Parámetros del Ciclo Rankine.

Se realizó una evaluación completa de la eficiencia energética del sistema, incluyendo el ciclo Rankine:

- *Propiedades del vapor*: calculadas en diferentes puntos del ciclo (caldera, condensador, bomba y turbina).
- *Eficiencia térmica del ciclo Rankine*: determinada en función de las entalpías en diferentes puntos.
- *Flujo másico del vapor*: calculado en función de la energía térmica disponible.
- *Potencia eléctrica generada*: determinada en función del flujo másico y las diferencias de entalpía.

Se utilizaron las funciones de la biblioteca XSteam para calcular las propiedades termodinámicas del vapor, y se generan gráficos para visualizar la variación de estos parámetros en función de ER. En la Figura 4, se presenta un diagrama que ilustra el proceso de desarrollo del modelo de gasificación. Este diagrama enfatiza cada una de las etapas de construcción del modelo, así como los parámetros y requisitos necesarios para su funcionamiento. Además, incluye la visualización y el gráfico de los resultados obtenidos. La Figura 5, representa un diagrama de bloques

en Simulink del modelo de gasificación de biomasa residual implementado en MATLAB. Simulink proporciona una plataforma visual e interactiva para la modelización, simulación y análisis, lo cual facilita

la comprensión y el desarrollo del modelo de gasificación.

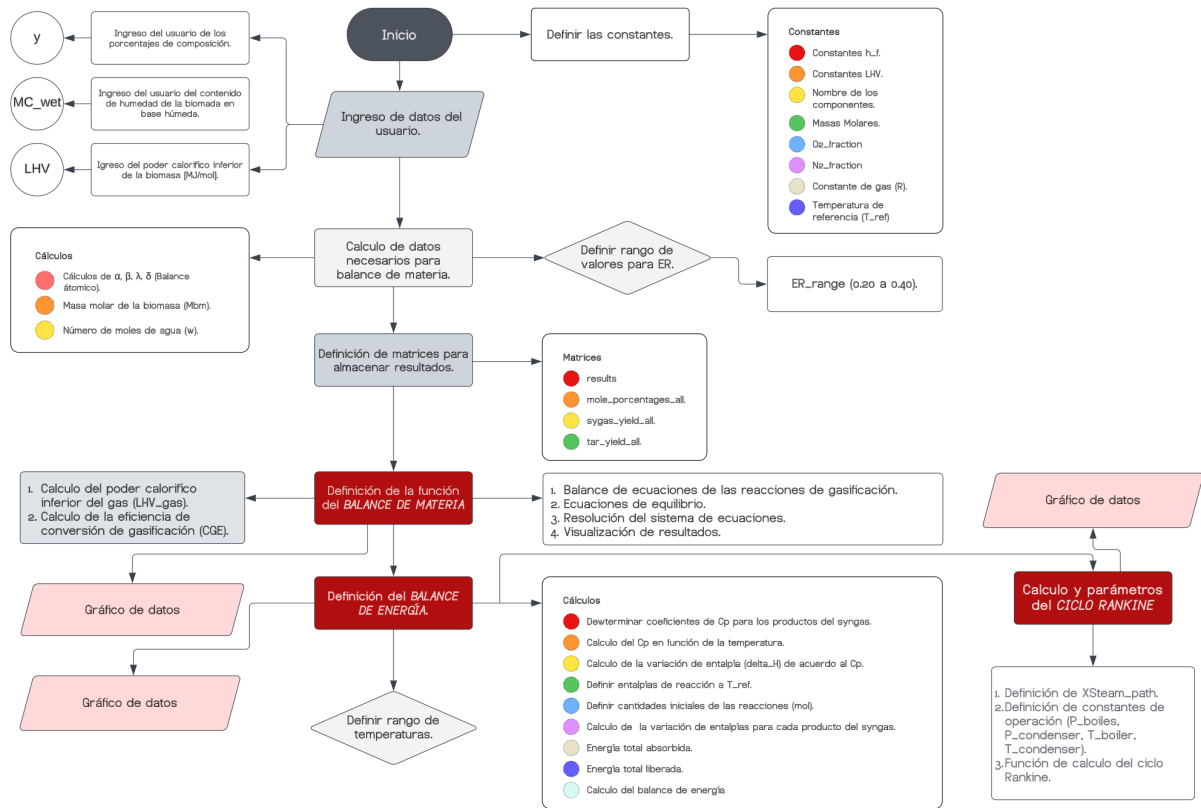


Figura 4. Diagrama de flujo de modelo del proceso de gasificación de biomasa residual utilizando MATLAB. Fuente: Elaboración propia.

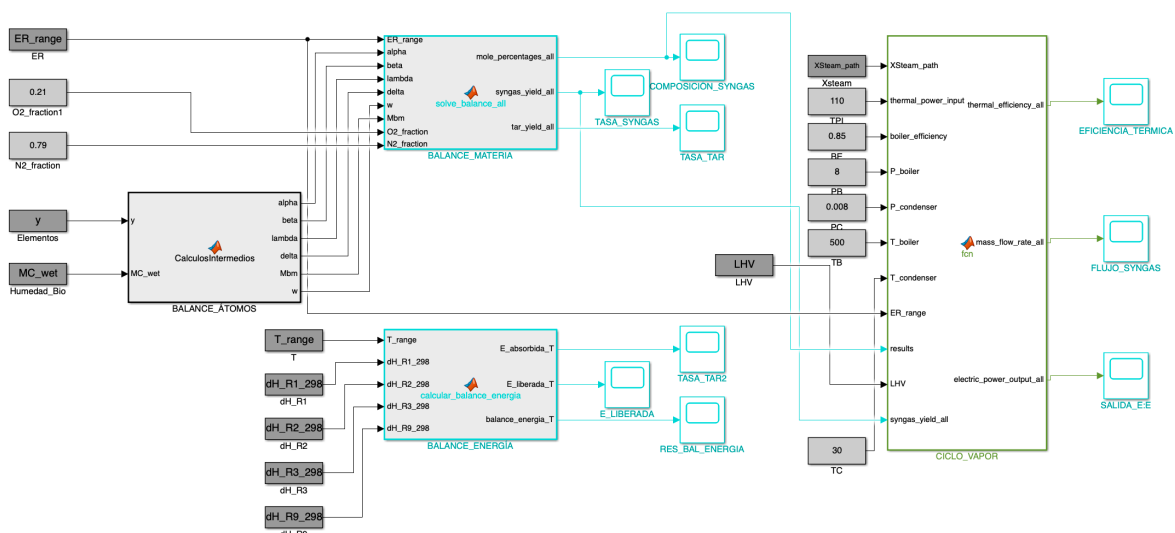


Figura 5. Diagrama de Simulink para el modelo de gasificación de biomasa, para el balance de materia, energía y ciclo Rankine. Fuente: Elaboración propia.

3. Resultados.

3.1. Viabilidad energética de la biomasa residual.

En el análisis de la viabilidad energética de diferentes tipos de biomasa residual en Colombia, se evaluaron tres tipos específicos: la cáscara de cacao en San Andrés de Tumaco, Nariño; el bagazo de caña y la cascarilla de café en Popayán, Cauca. La cáscara de cacao presenta un poder calorífico inferior (PCI) de 18.62 MJ/kg y una disponibilidad anual de 156.39 toneladas, resultando en un potencial energético total (PE) de 2,911.67 MJ/año y un potencial energético técnico (PET) de 2038.17 MJ/año. A pesar de su alto PCI, la limitada disponibilidad anual restringe su potencial a gran escala. El bagazo de caña, por otro lado, muestra un PCI de 20.86 MJ/kg y una amplia disponibilidad anual de 58,933.82 toneladas, resultando en un PE de 1,229,300.55 MJ/año y un PET de 860,510.39 MJ/año. Este residuo se destaca por su elevado volumen y eficiencia energética, convirtiéndolo en un candidato ideal para proyectos

energéticos a gran escala. En contraste, la cáscara de café tiene el PCI más alto de los tres, con 22.29 MJ/kg, pero su disponibilidad anual es baja, con solo 109.13 toneladas, lo que conduce a un PE de 2432.98 MJ/año y un PET de 1,703.09 MJ/año. Aunque es energéticamente eficiente, la escasa cantidad disponible limita su uso práctico en la matriz energética regional.

La Figura 6 ilustra las variaciones en el poder calorífico inferior (PCI) de tres tipos de biomasa residual: cacao, bagazo y café, mostrando que el bagazo posee un PCI ligeramente superior comparado con el cacao y el café. Esta diferencia puede atribuirse a variaciones en la composición de cada biomasa, como un mayor contenido de celulosa en el bagazo, lo que podría incrementar su eficiencia energética. Estos resultados son fundamentales para seleccionar la biomasa más adecuada para aplicaciones energéticas específicas, sugiriendo que el bagazo podría ser preferido en ciertos contextos.

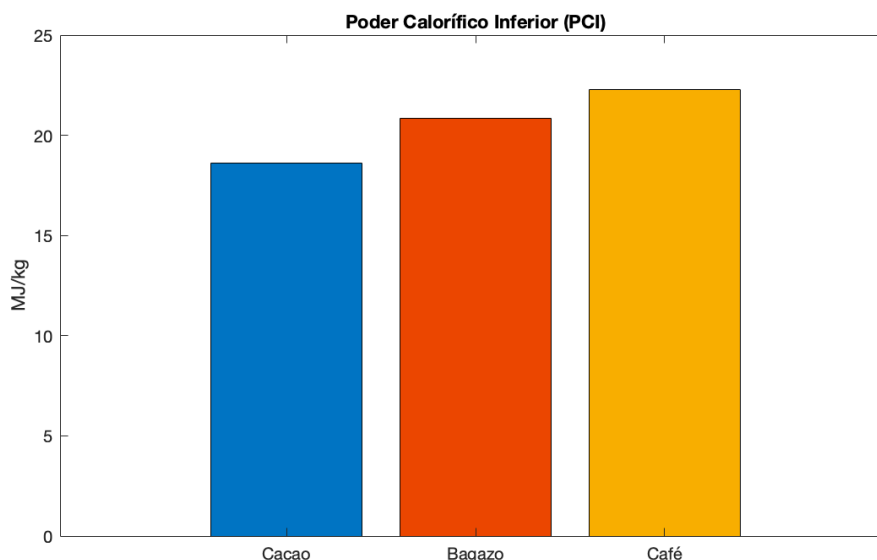


Figura 6. Poder calorífico inferior de las biomásas residuales. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 7 presenta el potencial energético teórico (PE) y técnico (PET) de tres tipos de biomasa residual: cacao, café y bagazo.

En la evaluación de la viabilidad de la biomasa residual como fuente de energía renovable, es relevante considerar tanto la capacidad teórica de generación de energía, que refleja el máximo potencial bajo condiciones ideales, como el potencial técnico, que integra limitaciones prácticas como la eficiencia de

conversión, la tecnología disponible y la logística de recolección y procesamiento. Esta distinción es esencial para una planificación energética realista y para estimar la contribución efectiva de la biomasa residual en la matriz energética de las regiones. Es relevante desarrollar estrategias energéticas que integren las características específicas de cada tipo de biomasa y las particularidades regionales, con el objetivo de maximizar tanto los beneficios energéticos como los económicos en cada localidad.

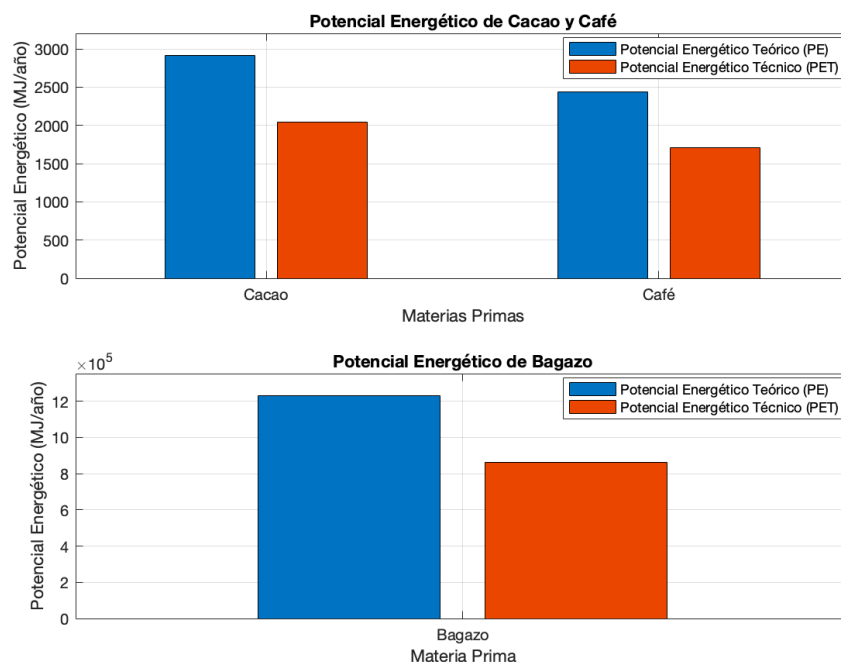


Figura 7. Potencial teórico y técnico de las biomásas residuales. Fuente: Elaboración propia.

Con base en este análisis, es importante priorizar el aprovechamiento del bagazo de caña panelera en Popayán debido a su abundancia y alto potencial energético. Para el cacao y el café, sería beneficioso investigar y desarrollar métodos para mejorar la recolección y el procesamiento de estos residuos, o explorar su uso en aplicaciones energéticas de nicho.

3.2. Aprovechamiento del potencial energético de la biomasa residual a través de la tecnología termoquímica de la gasificación.

Los resultados obtenidos de la valorización energética de la biomasa residual mediante gasificación termoquímica demuestran variaciones significativas en la composición del syngas, su rendimiento, el rendimiento del alquitrán y la eficiencia de conversión energética, en función de las razones de equivalencia (ER) y las temperaturas de operación analizadas. Utilizando un modelo en MATLAB para el equilibrio químico y energético del proceso, se realizaron balances de materia y energía.

3.2.1. Resultados de balance de materia.

• Cáscara de cacao.

La Figura 8 muestra la composición del gas de síntesis (syngas) en función de la relación de equivalencia (ER) para la gasificación de cáscara de cacao, revelando que el hidrógeno (H_2) alcanza su pico más alto, aproximadamente 70 %, a un ER de 0.29, lo que sugiere una optimización en la producción de H_2 en este punto. El monóxido de carbono (CO) presenta una concentración relativamente constante en ER bajos, pero disminuye significativamente en el pico de H_2 , mientras que el dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4) muestran variaciones menores, siendo el metano notablemente más alto en $ER = 0.32$. El nitrógeno (N_2) alcanza una concentración considerable en $ER = 0.3$. Estos resultados sugieren que un ER de 0.29 es óptimo para maximizar la producción de hidrógeno, lo cual es crucial para la eficiencia del proceso y tiene implicaciones importantes para aplicaciones industriales y energías renovables, resaltando la importancia de la optimización del ER en la gasificación de la cáscara de cacao.

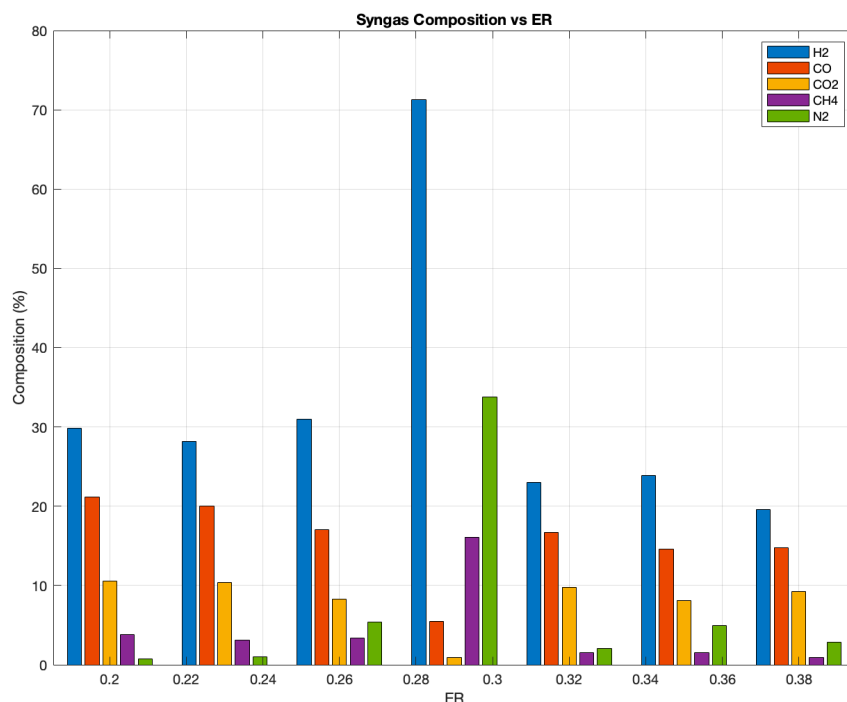


Figura 8. Composición del syngas para la biomasa residual de cáscara de cacao vs ER. Fuente: Elaboración propia.

• Cascarilla de café.

La gráfica de la Figura 9 muestra la composición del syngas en función de diferentes valores de la relación de equivalencia (ER) durante la gasificación de cascarrilla de café, indicando que el hidrógeno (H_2) alcanza su mayor concentración (~22 %) a un ER de 0.26, mientras que el monóxido de carbono (CO) tiene su pico (~21 %) a un ER de 0.29. El dióxido de carbono (CO_2) mantiene una concentración más uniforme, con un máximo (~15 %) a un ER de 0.26 y 0.29, y el metano (CH_4) permanece bajo en todos los ER, con un máximo (~5 %) a un ER de 0.26. El nitrógeno (N_2) presenta su mayor concentración (~20 %) a un ER de 0.38. Este análisis sugiere que los ERs de 0.26 y 0.29 son óptimos para maximizar la producción de H_2 y CO.

• Bagazo de caña panelera.

En la Figura 10 se observa la composición del gas de síntesis (syngas) en función de diferentes valores de la relación de equivalencia (ER) durante la

gasificación del bagazo de caña panelera, indicando que la concentración de hidrógeno (H_2) es la más alta, alcanzando su máximo (~28 %) en un ER de 0.2 y 0.22, y disminuyendo con el aumento del ER, mientras que el monóxido de carbono (CO) sigue una tendencia similar, con máximos de 21-22 % en los ER más bajos. Por otro lado, el dióxido de carbono (CO_2) incrementa su concentración desde aproximadamente 10 % a un ER de 0.2 hasta cerca de 15 % en un ER de 0.38, mientras que el metano (CH_4) permanece bajo en todos los valores de ER, por debajo del 5 %. La concentración de nitrógeno (N_2) también aumenta con el ER, alcanzando su máximo (~18 %) en un ER de 0.38. Este análisis sugiere que un menor ER favorece la producción de H_2 y CO, componentes cruciales para aplicaciones energéticas eficientes, mientras que un mayor ER incrementa la proporción de CO_2 y N_2 , reduciendo la calidad del syngas para ciertos usos. Ajustar el ER es esencial para optimizar la composición del syngas según las necesidades específicas, destacando la importancia de controlar este parámetro en el proceso de gasificación del bagazo de caña panelera para maximizar la eficiencia y calidad del syngas producido.

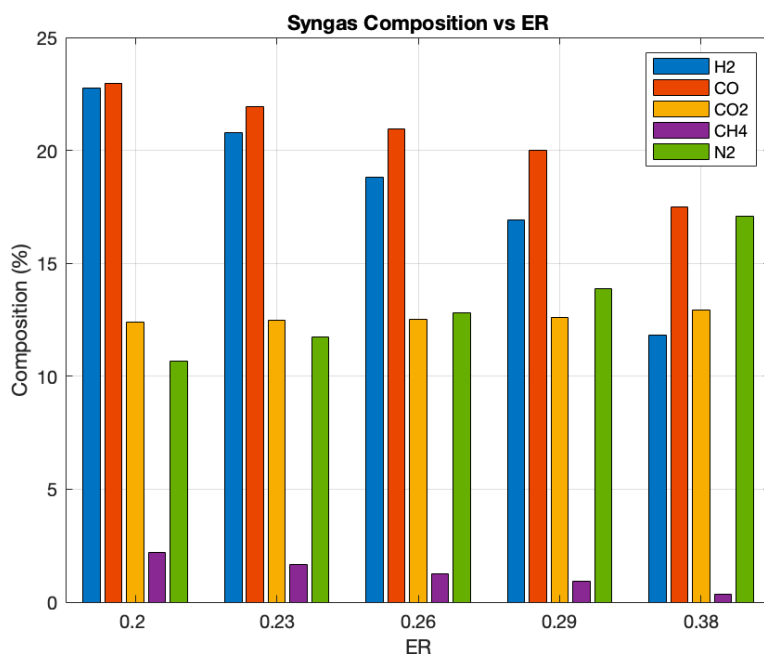


Figura 9. Composición del syngas para la biomasa residual de cascarilla de café vs ER. Fuente: Elaboración propia.

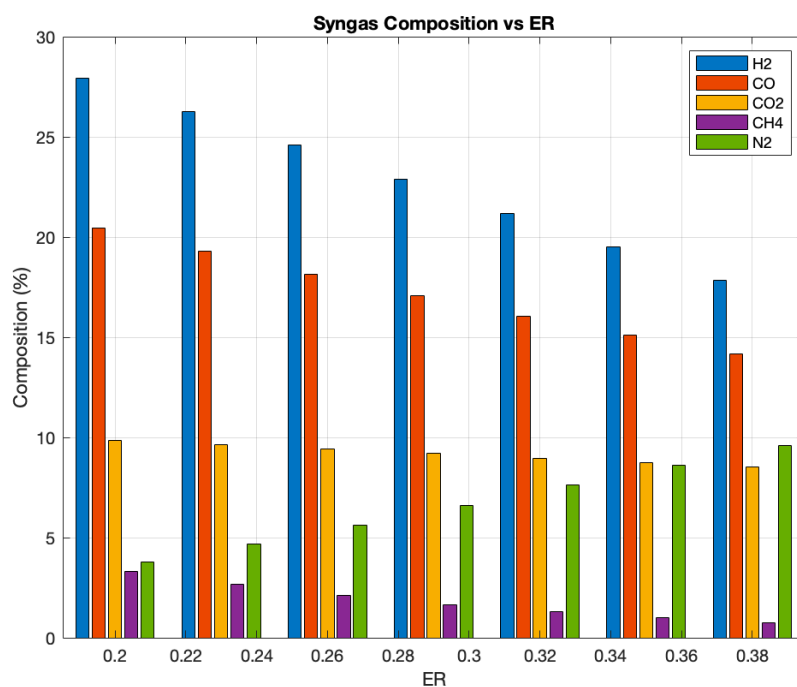


Figura 10. Composición del syngas para la biomasa residual del bagazo de caña panelera vs ER. Fuente: Elaboración propia.

3.2.2.2. Rendimiento del syngas y alquitrán.

• Cáscara de cacao.

La Figura 11 ilustra el rendimiento del syngas (en m^3/kg) en función de diferentes valores de la relación de equivalencia (ER) durante la gasificación de

cáscara de cacao. Se observa que el rendimiento del syngas varía significativamente con el ER, alcanzando un pico máximo de $9.70 \text{ m}^3/\text{kg}$ en un ER de 0.29. Este valor sugiere que, en este punto de operación, se logra la mayor eficiencia en la producción de syngas. En contraste, a medida que el ER se aleja de este punto óptimo, el rendimiento disminuye, mostrando valores mínimos alrededor de $5.28 \text{ m}^3/\text{kg}$

en un ER de 0.39 y 5.43 m³/kg en un ER de 0.33. Estos resultados indican que un ER de 0.29 no solo maximiza la producción de hidrógeno (como se observó en la gráfica anterior), sino que también

optimiza el rendimiento total del syngas, destacando la importancia de ajustar la relación de equivalencia para mejorar la eficiencia del proceso de gasificación de cáscara de cacao.

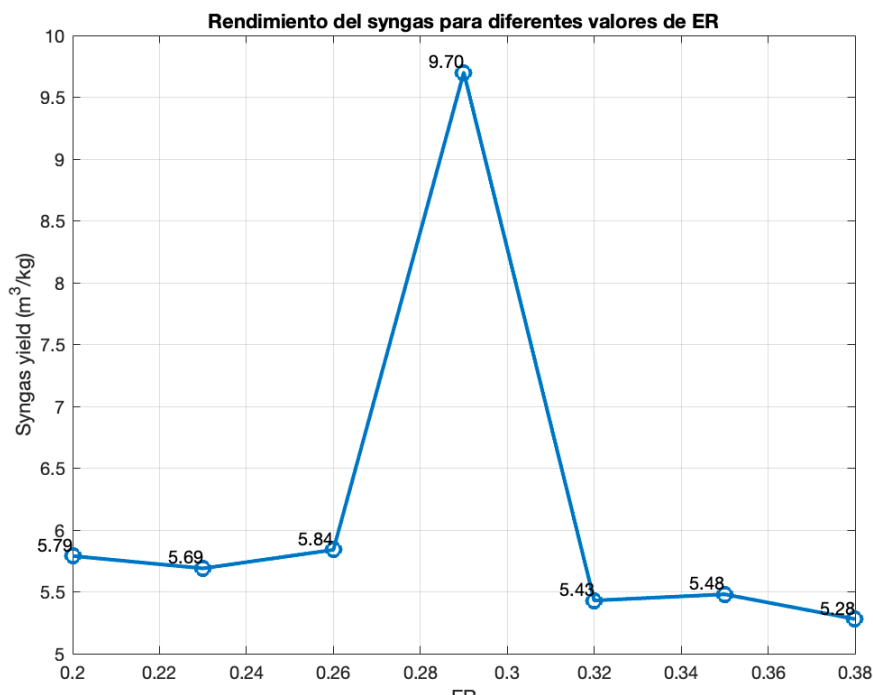


Figura 11. Rendimiento del syngas producido de biomasa residual de cáscara de cacao vs ER. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 12 muestra que el rendimiento del alquitrán disminuye consistentemente con el aumento de la relación de equivalencia (ER) durante la gasificación de cáscara de cacao, comenzando en 42.61 % a un ER de 0.2 y reduciéndose a 23.06 % a un ER de 0.38. Este comportamiento sugiere que un mayor ER favorece la reducción de la producción de alquitrán, un subproducto no deseado debido a su complejidad y potencial para causar problemas en los equipos de procesamiento. La disminución del rendimiento de alquitrán con el incremento del ER indica una mejora en la calidad del syngas producido, reduciendo impurezas y facilitando su uso en aplicaciones energéticas.

• Cascarilla de café.

En la Figura 13 se observa que el rendimiento del syngas (en m³/kg) durante la gasificación de cascarilla de café se mantiene constante, variando ligeramente de 1.23 m³/kg a 1.24 m³/kg para valores de la relación de equivalencia (ER) de 0.2 a 0.38. Esto indica que el rendimiento del syngas es poco sensible a cambios en el ER dentro de este rango, sugiriendo que, aunque la composición del syngas varía con el

ER, el volumen total producido por kilogramo de cascarilla no se ve significativamente afectado. Por lo tanto, ajustar el ER es más relevante para optimizar la calidad del syngas (proporción de H₂, CO, CO₂, CH₄ y N₂) que para aumentar la cantidad total de syngas producido, garantizando una producción estable independientemente de pequeñas variaciones en el ER.

Se visualiza en la Figura 14 que el rendimiento de alquitrán (en %) durante la gasificación de cascarilla de café disminuye de 42.61 % a un ER de 0.2 a 23.60 % a un ER de 0.38, indicando una tendencia descendente a medida que aumenta la relación de equivalencia (ER). Esto sugiere que un mayor ER favorece la reducción de la producción de alquitrán, un subproducto no deseado debido a su complejidad y potencial para causar problemas en los equipos de procesamiento. Por lo tanto, ajustar el ER a valores más altos puede ser una estrategia efectiva para minimizar la producción de alquitrán, mejorando la eficiencia y limpieza del proceso de gasificación de cascarilla de café y optimizando la calidad del syngas producido.

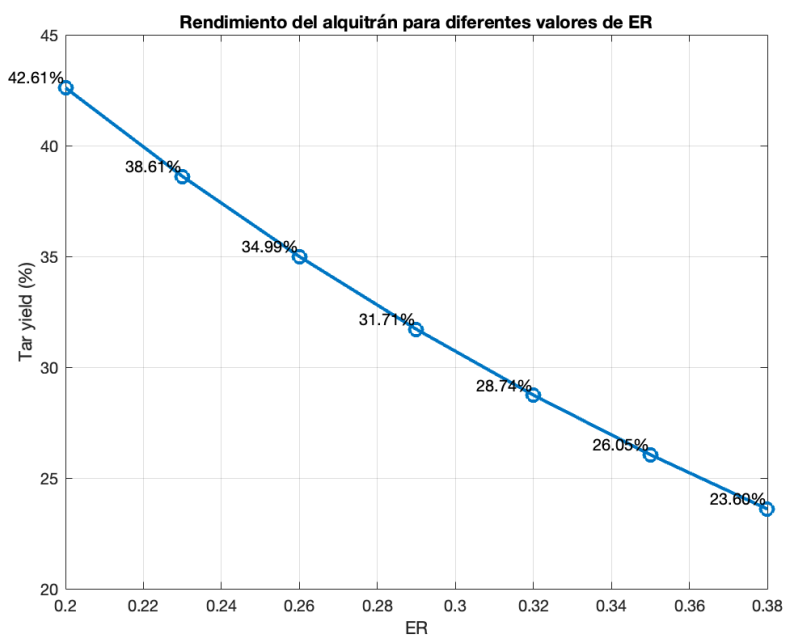


Figura 12. Rendimiento del alquitrán producido de biomasa residual de cáscara de cacao vs ER. Fuente: Elaboración propia.

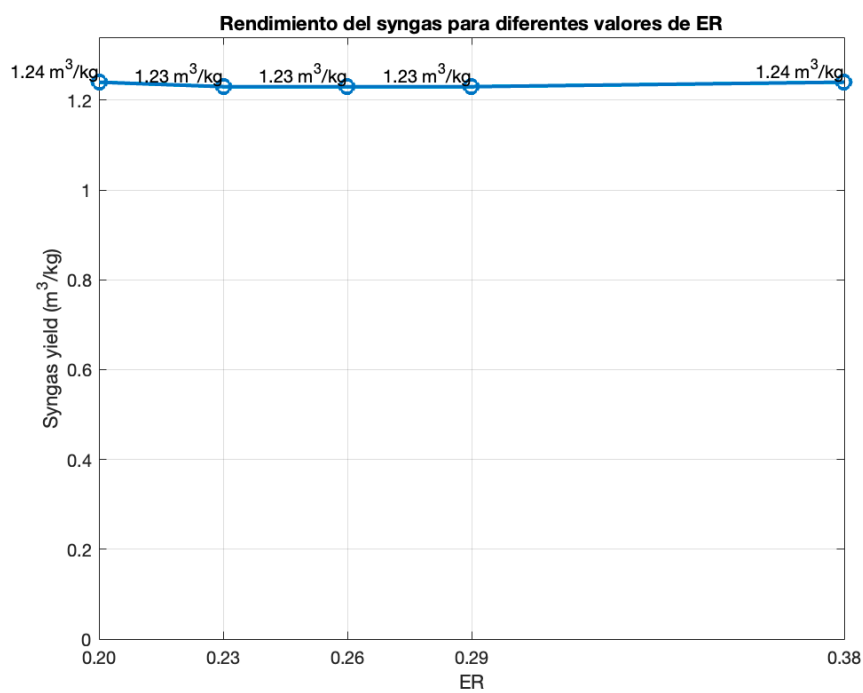


Figura 13. Rendimiento del syngas producido de biomasa residual de cascarrilla de café vs ER. Fuente: Elaboración propia.

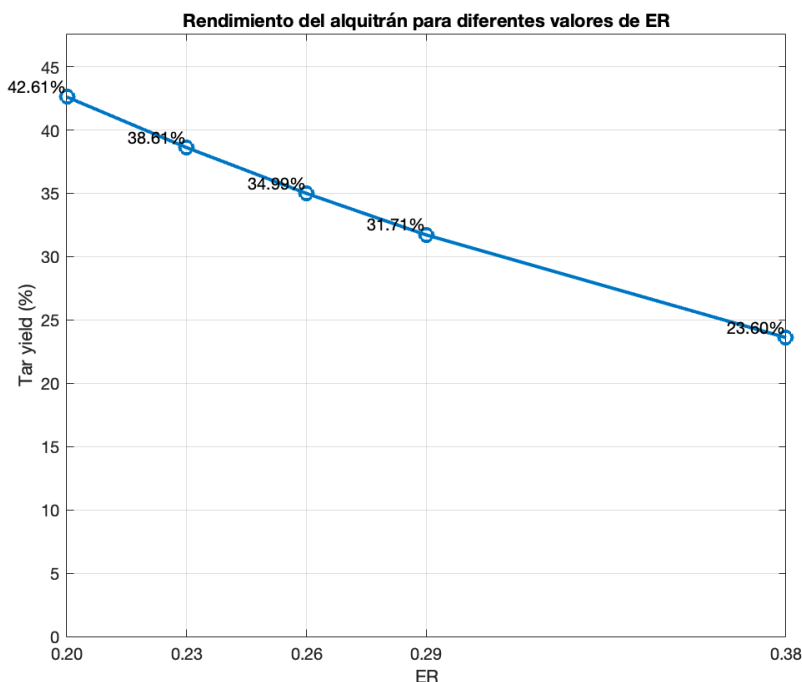


Figura 14. Rendimiento del alquitrán producido de biomasa residual de cascarilla de café vs ER. Fuente: Elaboración propia.

• Bagazo de caña panelera.

Se ilustra en la Figura 15 el rendimiento del gas de síntesis (syngas) en función de diferentes valores de la relación de equivalencia (ER) durante la gasificación del bagazo de caña panelera. Se observa una disminución continua del rendimiento del syngas a medida que aumenta el ER, comenzando en 2.47 m³/kg a un ER de 0.20 y descendiendo a 2.39 m³/kg a un ER de 0.38. Este comportamiento indica que un menor ER favorece un mayor rendimiento del syngas, sugiriendo que para maximizar la producción de syngas, es preferible operar a un ER más bajo dentro del rango estudiado. Este análisis resalta la importancia de ajustar la relación de equivalencia para optimizar la eficiencia del proceso de gasificación. La tendencia decreciente del rendimiento del syngas con el aumento del ER evidencia que, al incrementar la cantidad de aire en el proceso, se puede estar diluyendo la concentración de gases combustibles valiosos, como el hidrógeno y el monóxido de carbono, en el syngas. Por lo tanto, mantener un ER bajo es crucial para maximizar la cantidad de syngas producido a partir del bagazo de caña panelera, lo que tiene implicaciones significativas para la eficiencia y viabilidad económica del proceso de gasificación.

En la Figura 16 se visualiza el rendimiento de alquitrán (en %) en función de diferentes valores de la relación de equivalencia (ER) durante la gasificación del bagazo de caña panelera, indicando una tendencia decreciente desde aproximadamente 42 % a un ER de 0.20 hasta alrededor de 25 % a un ER de 0.38. Este comportamiento sugiere que un mayor ER favorece la reducción de la producción de alquitrán, un subproducto no deseado debido a su naturaleza compleja y su potencial para causar problemas operativos en los equipos de gasificación. El análisis destaca la importancia de ajustar la relación de equivalencia no solo para optimizar la producción de syngas, sino también para minimizar la generación de alquitrán, mejorando así la eficiencia y limpieza del proceso de gasificación. Controlar el ER es relevante para balancear la producción de syngas y la minimización de subproductos no deseados, optimizando la eficiencia global del proceso de gasificación del bagazo de caña panelera.

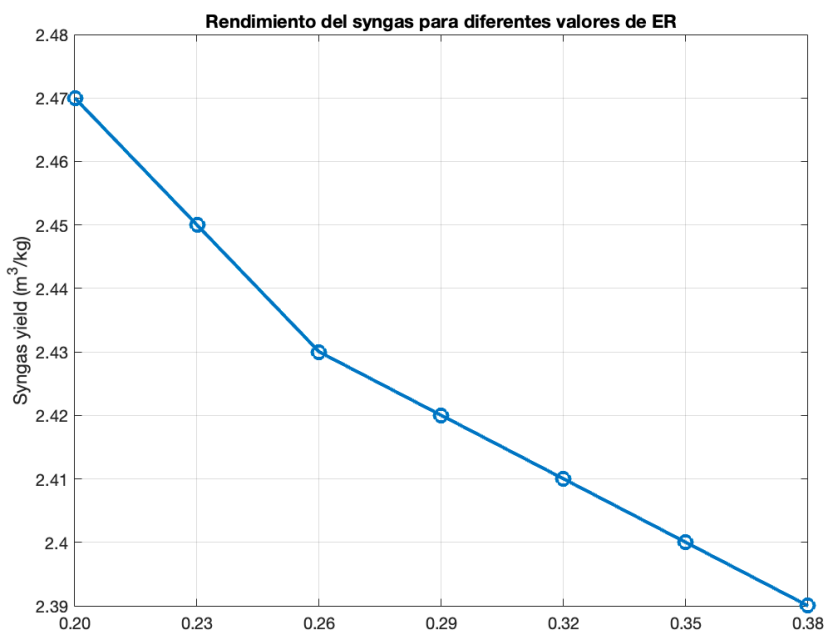


Figura 15. Rendimiento del syngas producido de biomasa residual de bagazo de caña panelera vs ER. Fuente: Elaboración propia.

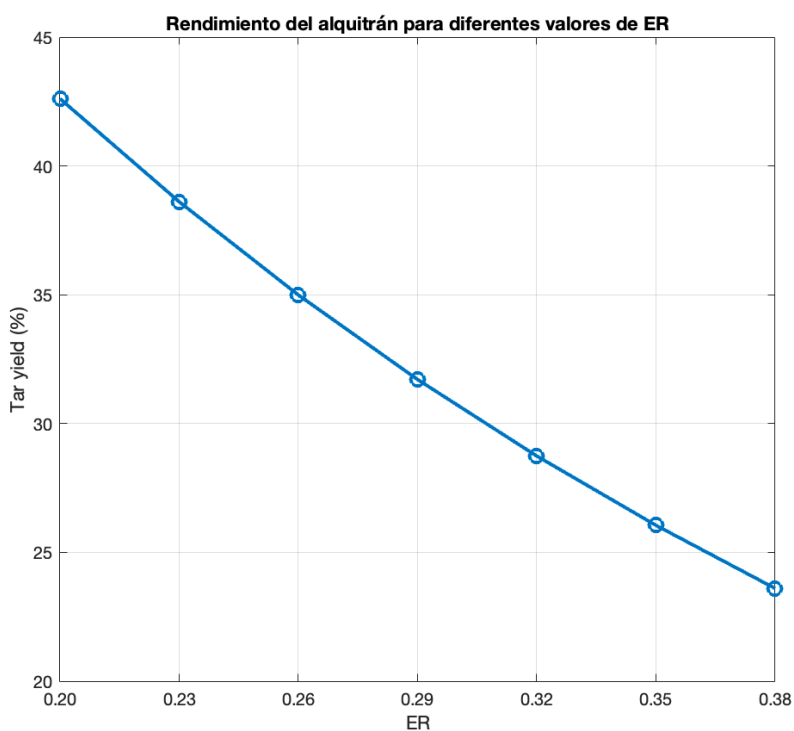


Figura 16. Rendimiento del alquitrán producido de biomasa residual de bagazo de caña panelera vs ER. Fuente: Elaboración propia.

3.2.2.3. Poder calorífico inferior de syngas y eficiencia de conversión para la cáscara de cacao.

• Cáscara de cacao.

En la gráfica de la Figura 17 se visualiza el valor calorífico inferior (LHV) del gas de síntesis en función de diferentes valores de la relación de equivalencia (ER) durante la gasificación de cáscara de cacao. Se observa que el LHV se mantiene constante en

aproximadamente 0.28 MJ/m^3 para ERs de 0.2 a 0.26, y luego presenta un pico máximo de 0.31 MJ/m^3 a un ER de 0.29. Posteriormente, el LHV desciende abruptamente a 0.27 MJ/m^3 para ERs de 0.32 a 0.38. Este comportamiento indica que un ER de 0.29 no solo maximiza la producción de hidrógeno y el rendimiento del syngas, sino que también

optimiza el valor calorífico del gas producido. La disminución del LHV fuera de este punto sugiere una menor eficiencia energética del syngas a ERs más altos o más bajos. Por lo tanto, ajustar el ER a 0.29 es determinante para maximizar tanto la eficiencia energética como la calidad del syngas en el proceso de gasificación de cáscara de cacao.

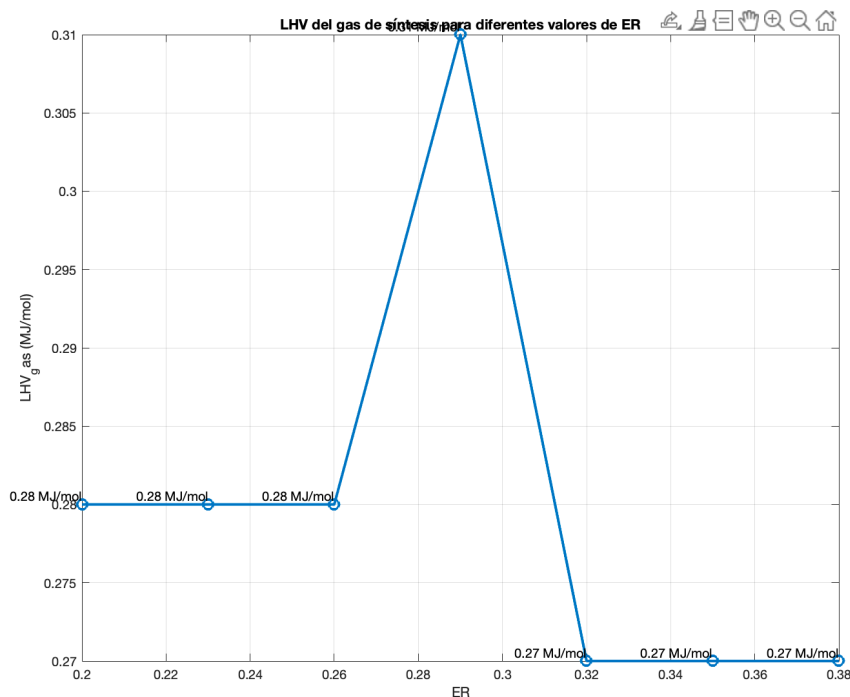


Figura 17. LHV (PCI) del syngas para diferentes valores de ER. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 18 se observa la eficiencia de conversión de gas (CGE) en función de diferentes valores de la relación de equivalencia (ER) durante la gasificación de cáscara de cacao, revelando que la CGE se mantiene relativamente constante entre 9.21 % y 9.31 % para ERs de 0.2 a 0.26, con un incremento

notable a un máximo de 10.31 % en un ER de 0.29, seguido de una disminución abrupta hasta un mínimo de 8.94 % a un ER de 0.38. Esto indica que un ER de 0.29 optimiza no solo la producción de hidrógeno y el valor calorífico del syngas, sino también la eficiencia de conversión del proceso de gasificación.

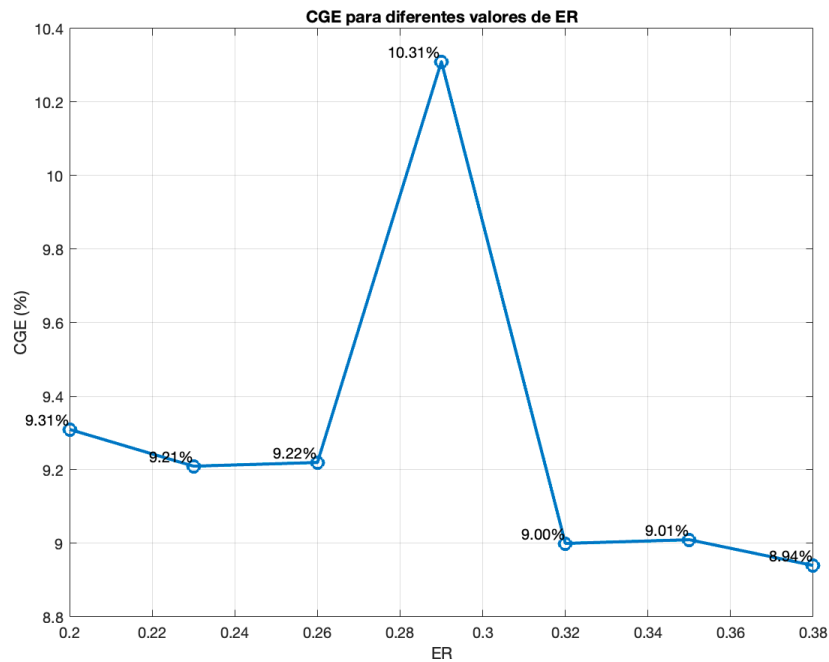


Figura 18. Eficiencia de conversión de gas para la cáscara de cacao vs ER. Fuente: Elaboración propia.

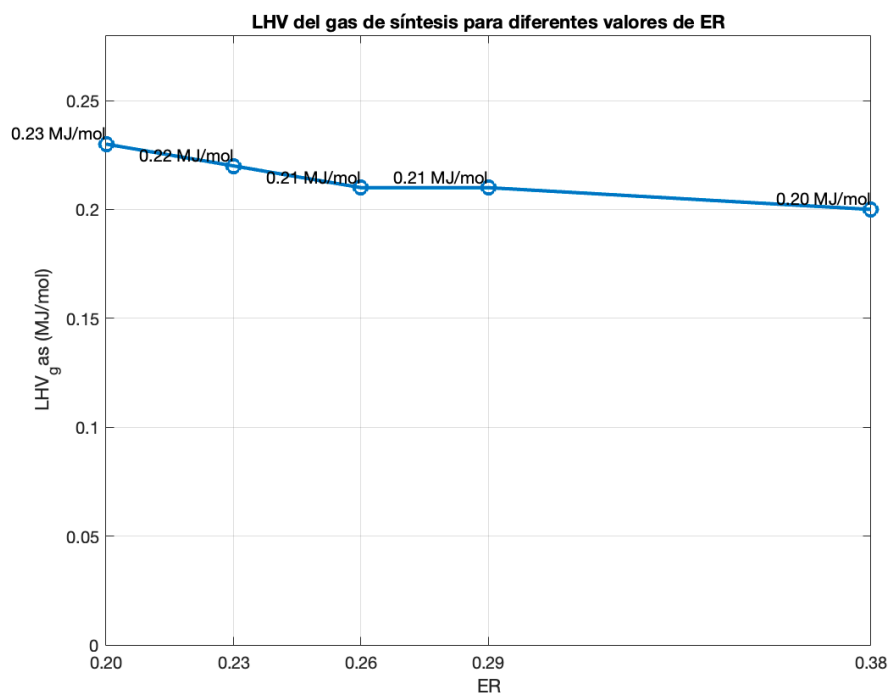


Figura 19. LHV (PCI) del syngas para diferentes valores de ER. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 20 se ilustra que la eficiencia de conversión de gas (CGE) disminuye gradualmente a medida que aumenta la relación de equivalencia (ER) durante la gasificación de cascavilla de café, comenzando en 6.23 % a un ER de 0.2 y reduciéndose a 5.51 % a un ER de 0.38. Este comportamiento indica

que una menor relación de equivalencia favorece una mayor eficiencia de conversión del gas, sugiriendo que operar a un ER más bajo dentro del rango estudiado optimiza la eficiencia del proceso de gasificación.

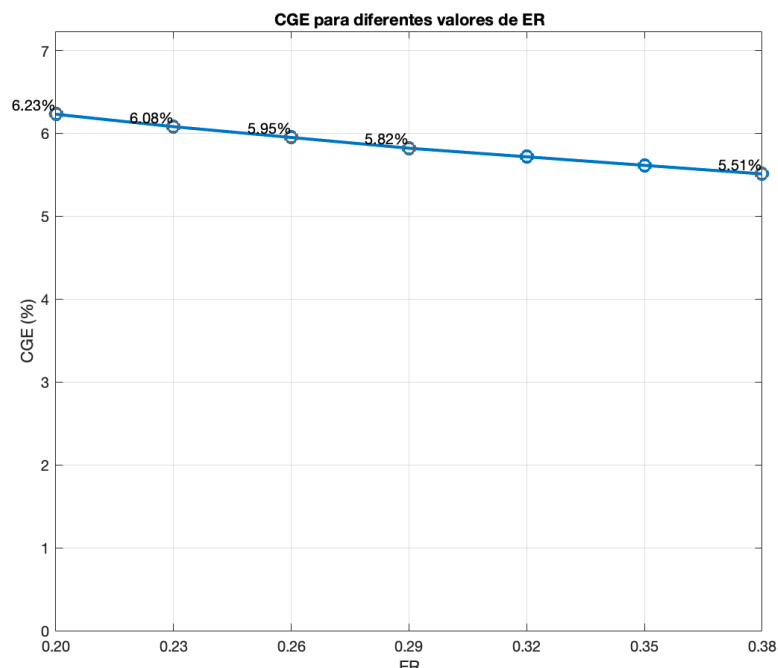


Figura 20. Eficiencia de conversión de gas para la cascarilla de café vs ER. Fuente: Elaboración propia.

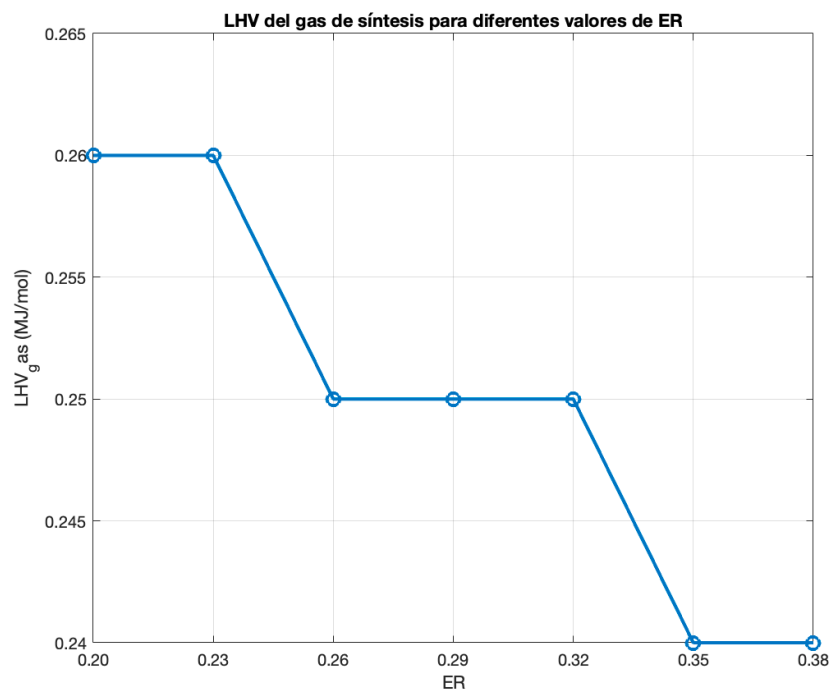


Figura 21. LHV (PCI) del syngas para diferentes valores de ER. Fuente: Elaboración propia.

• Bagazo de caña panelera.

La gráfica de la Figura 21 muestra el valor calorífico inferior (LHV) del gas de síntesis (syngas) en

función de diferentes valores de la relación de equivalencia (ER) durante la gasificación del bagazo de caña panelera, indicando que el LHV se mantiene en 0.26 MJ/mol para ERs de 0.20 a 0.23, disminuye a 0.25 MJ/mol entre 0.26 y 0.32, y desciende a 0.24

MJ/mol para ERs de 0.35 a 0.38. Este comportamiento sugiere que un menor ER favorece un mayor valor calorífico del syngas, implicando una mayor eficiencia energética del gas producido.

En la Figura 22 se aprecia la eficiencia de conversión de gas (CGE) en función de diferentes valores de la

relación de equivalencia (ER) durante la gasificación del bagazo de caña panelera, indicando una disminución continua de la CGE desde 7.8 % a un ER de 0.20 hasta 7.1 % a un ER de 0.38, lo que sugiere que una menor ER favorece una mayor eficiencia de conversión del gas.

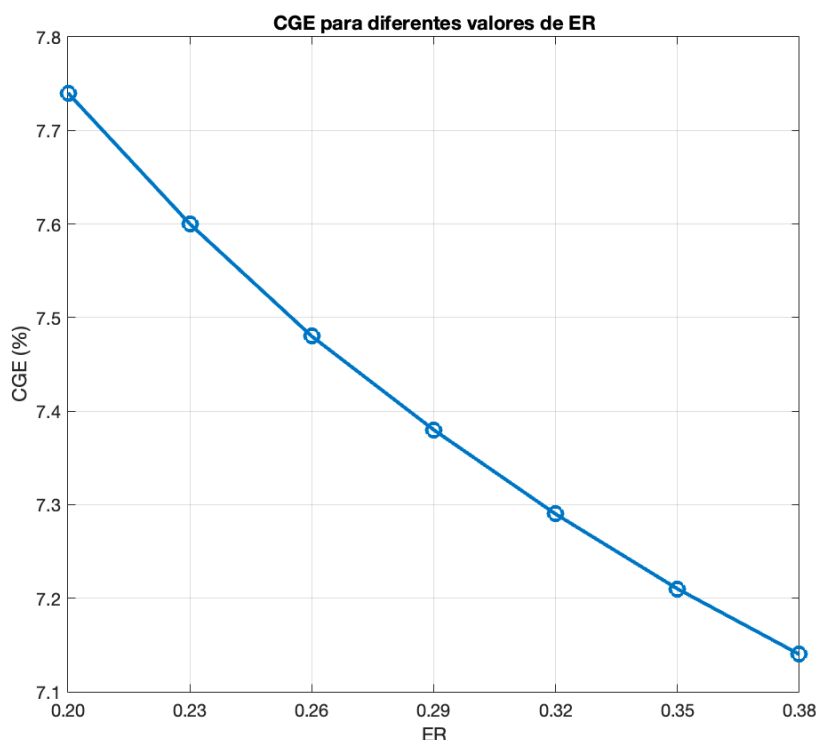


Figura 22. Eficiencia de conversión de gas para el bagazo de caña panelera vs ER. Fuente: Elaboración propia.

3.2.3. Ciclo Rankine.

• Cáscara de cacao.

La producción de energía eléctrica (en kW) a partir del ciclo de vapor utilizando el syngas producido por la gasificación de cáscara de cacao, en función de diferentes valores de la relación de equivalencia (ER) se visualiza en la Figura 23, revelando que la producción de energía alcanza un pico significativo de 10,439.49 kW a un ER de 0.3, mientras que en otros valores de ER es considerablemente menor: 1,906.56 kW a ER de 0.2, 1,692.84 kW a ER de 0.25, 1,790.53 kW a ER de 0.28, 1,187.36 kW a ER de 0.35 y 942.29 kW a ER de 0.4. Este análisis indica

que el ER de 0.3 es óptimo para maximizar la producción de energía eléctrica, lo cual es significativo ya que supera ampliamente la producción obtenida a otros valores de ER.

• Cascarilla de café.

La Figura 24 ilustra la producción de energía eléctrica (en kW) en función de la relación de equivalencia (ER) durante la gasificación de cascarilla de café, mostrando que la máxima generación de energía se alcanza a un ER de 0.20 con 95.12 kW, disminuyendo progresivamente a 86.40 kW (ER = 0.23), 78.63 kW (ER = 0.26), 71.76 kW (ER = 0.29) y 55.87 kW (ER = 0.38).

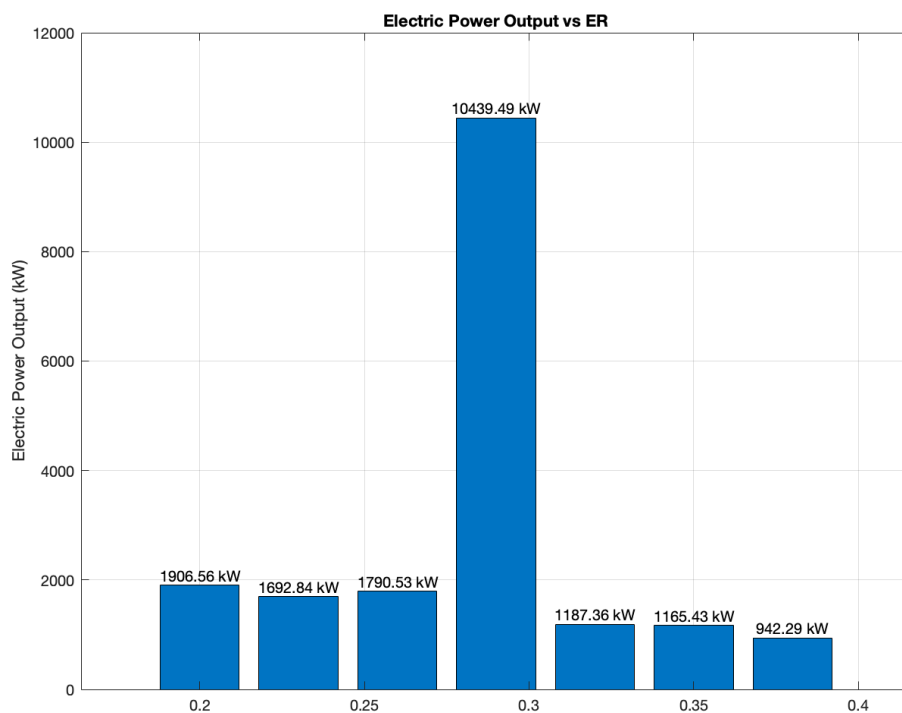


Figura 23. Generación de energía eléctrica a partir de la producción de syngas vs ER. Fuente: Elaboración propia.

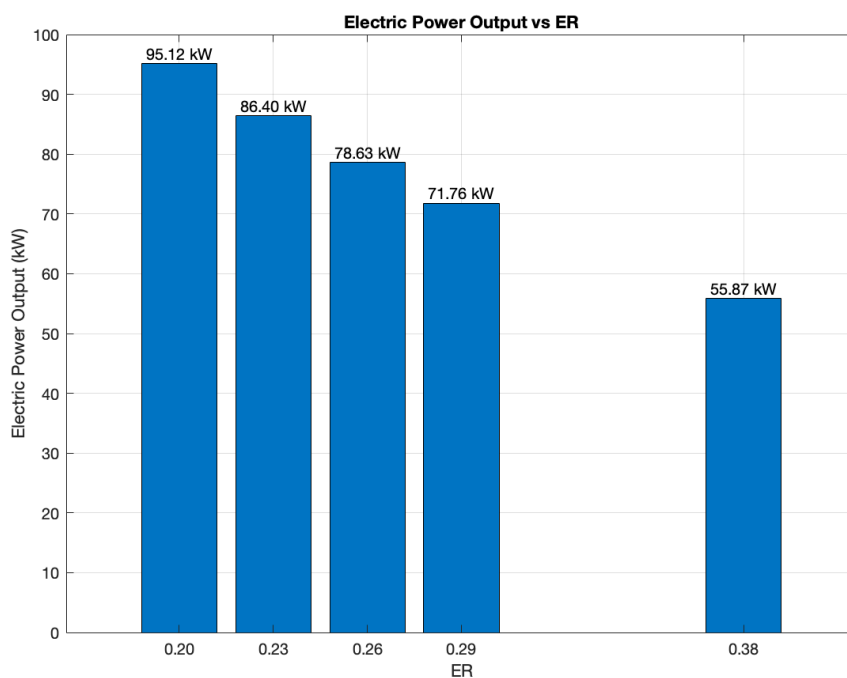


Figura 24. Generación de energía eléctrica a partir de la producción de syngas vs ER. Fuente: Elaboración propia.

• Bagazo de caña panelera.

La Figura 25 muestra que la producción de energía eléctrica es máxima (aproximadamente 350 kW) a un ER de 0.20 y disminuye continuamente a medida que el ER aumenta, alcanzando alrededor de 200 kW

a un ER de 0.38. Esta tendencia sugiere que mantener el ER en niveles bajos favorece una mayor producción de energía eléctrica, probablemente debido a una mayor concentración de gases combustibles como el hidrógeno (H_2) y el monóxido de carbono (CO).

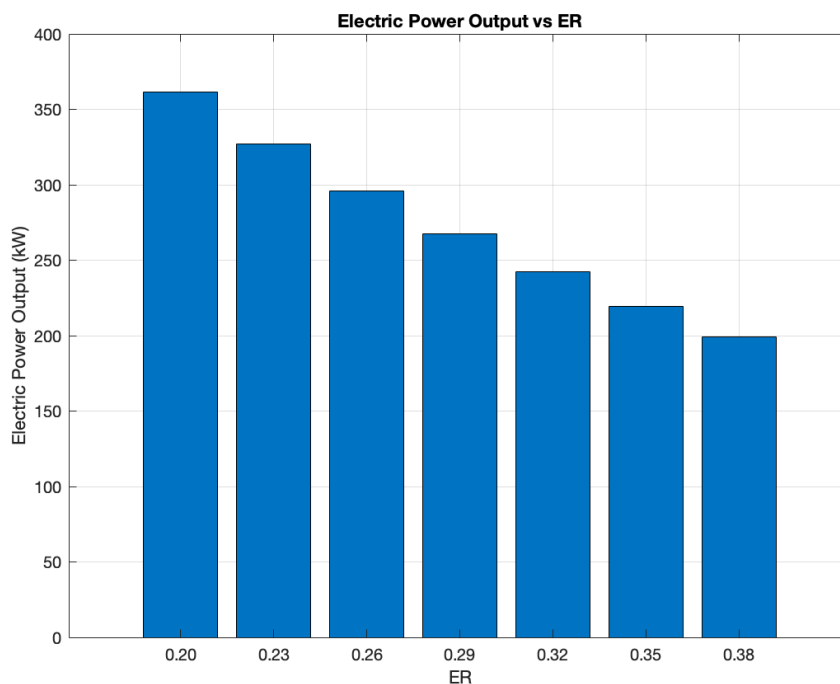


Figura 25. Generación de energía eléctrica a partir de la producción de syngas vs ER. Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Resultados de balance de energía.

Se visualiza en la Figura 26 el balance de energía para diferentes temperaturas en un modelo de equilibrio termodinámico estequiométrico del proceso de gasificación en un gasificador de lecho fijo tipo downdraft. La energía absorbida (curva azul) disminuye ligeramente de 238.7 kJ/mol a 198.7 kJ/mol al aumentar la temperatura de 1,100 K a 1,700 K. Simultáneamente, la energía liberada (curva roja) también desciende, pasando de -198.4 kJ/mol a -259.9 kJ/mol en el mismo rango de temperatura. El balance de energía (curva amarilla), que es la diferencia entre la energía absorbida y la energía liberada, muestra una tendencia decreciente, comenzando en 40.3 kJ/mol y alcanzando -61.3 kJ/mol a temperaturas más altas. Este comportamiento sugiere que el proceso de gasificación se vuelve más exergónico a temperaturas elevadas, lo que puede mejorar la eficiencia del proceso. Sin embargo, un balance de energía negativo indica la necesidad de controlar adecuadamente las condiciones operativas para evitar pérdidas excesivas de energía. La temperatura óptima para el balance de energía se encuentra alrededor de 1,373.15 K, donde el balance es cercano a cero, lo que indica una eficiencia energética

equilibrada en la conversión de la biomasa residual en syngas.

3.3 Comparación de resultado de las diferentes biomasa residuales objeto de estudio.

El gráfico de la Figura 27 ilustra la composición máxima de syngas obtenida a partir de diferentes tipos de biomasa bajo condiciones específicas de relación de equivalencia (ER). La cáscara de cacao destaca por su alta producción de hidrógeno (H_2), alcanzando aproximadamente el 70 % con un ER de 0.28, mientras que la cascarilla de café y el bagazo de caña panelera también muestran un considerable potencial en la producción de H_2 y monóxido de carbono (CO). Los niveles de CO y dióxido de carbono (CO_2) en estas biomasa son significativos, con CO alcanzando hasta el 25 % y CO_2 hasta el 20 %, lo que implica importantes repercusiones en la eficiencia y las emisiones del proceso de gasificación. Estos niveles de CO_2 son críticos ya que afectan la calidad del syngas y requieren optimización en la etapa de limpieza de gas. El contenido de metano (CH_4) es menor y se explica por la naturaleza termodinámica y estequiométrica del modelo utilizado.

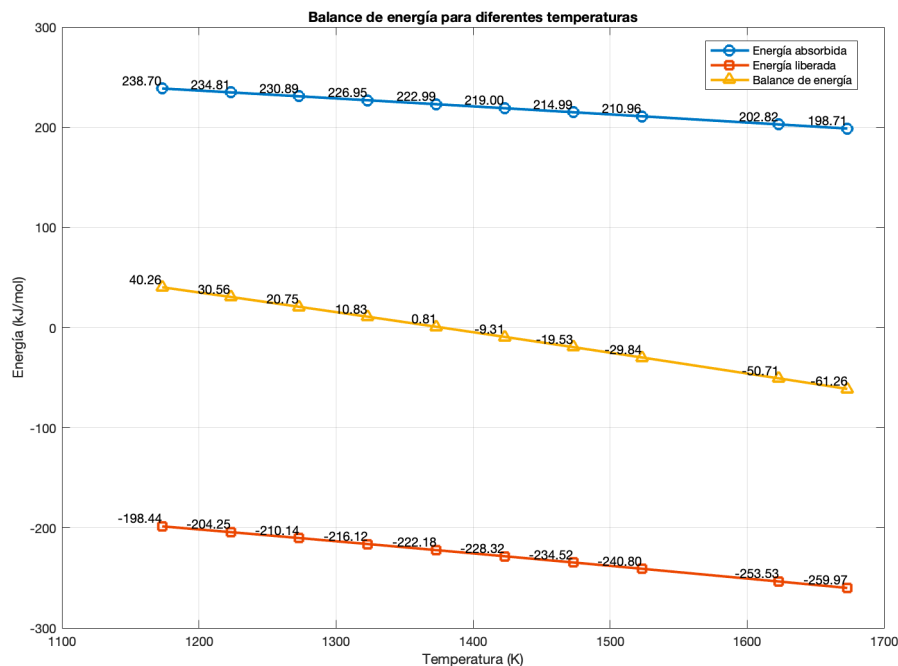


Figura 26. Balance de energía para la biomasa residual del modelo a diferentes temperaturas. Fuente: Elaboración propia.

La relación de la producción de H_2 y CO como los gases más predominantes en la gasificación se correlaciona directamente con el alto porcentaje de carbono presente en las biomasas: 48.70 % en la cáscara de cacao, 37.70 % en la cascarilla de café y 38.37 % en el bagazo de caña panelera. El alto contenido de carbono favorece las reacciones de gasificación que producen H_2 y CO , que son los principales componentes del syngas. La variabilidad en los valores de ER (0.23 a 0.29) para optimizar la producción de cada gas sugiere la necesidad de ajustar las condiciones del proceso de gasificación para maximizar la eficiencia y la calidad del syngas obtenido, dependiendo del tipo de biomasa utilizado.

Se presenta en la Figura 28 el rendimiento máximo de syngas (kg de syngas por kg de biomasa) para diferentes tipos de biomasa bajo distintas relaciones de

equivalencia (ER). La cáscara de cacao exhibe un rendimiento sobresaliente de aproximadamente 9 kg/kg con un ER de 0.28, indicando una conversión altamente eficiente de biomasa en syngas, atribuible a su alta composición de carbono (48.70 %). En contraste, la cascarilla de café presenta un rendimiento significativamente menor, alrededor de 1 kg/kg con un ER de 0.38, reflejando una menor eficiencia posiblemente debido a su menor contenido de carbono (37.70 %) y otras características estructurales. El bagazo de caña panelera muestra un rendimiento intermedio de aproximadamente 3 kg/kg con un ER de 0.2, correlacionado con su composición de carbono del 38.37 %. Los altos rendimientos de syngas implican una mayor eficiencia energética y económica, optimizando la conversión de la energía contenida en la biomasa y reduciendo los residuos sólidos post-gasificación.

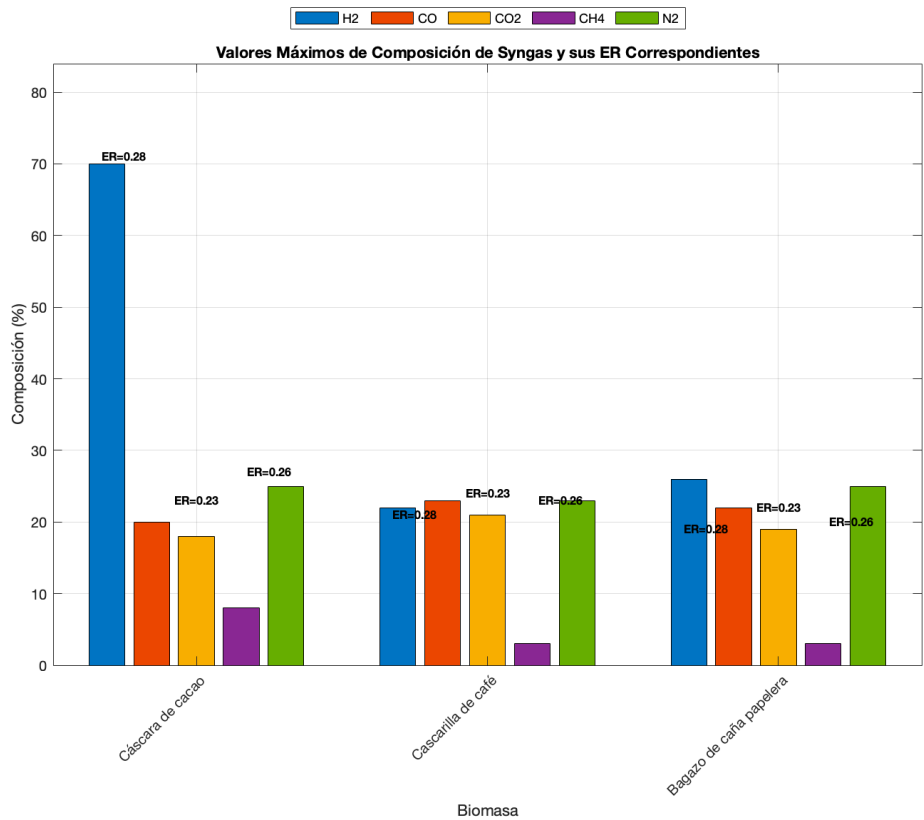


Figura 27. Valores máximos de composición del syngas en cada una de las biomásas residuales. Fuente: Elaboración propia.

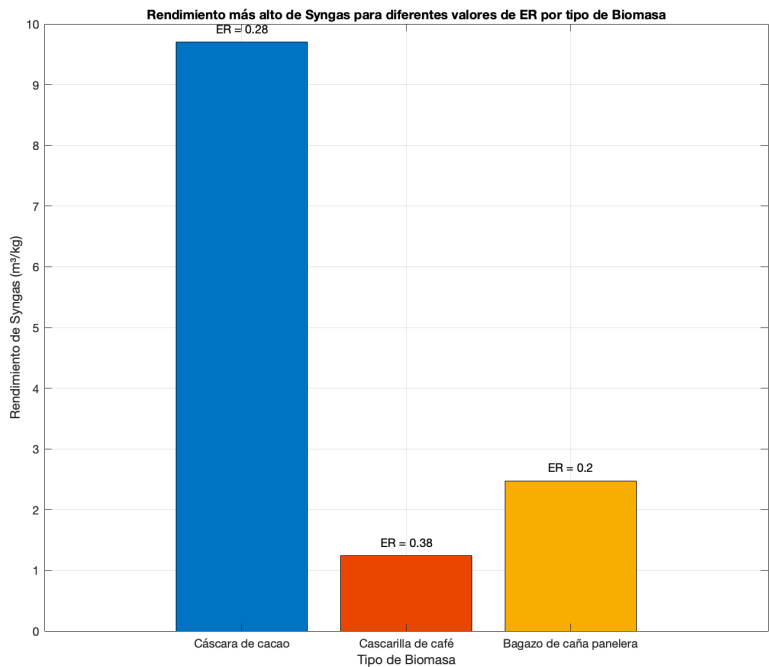


Figura 28. Valores máximos del rendimiento del syngas para valores de ER por tipo de biomasa residual. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 29 expone el Poder Calorífico Inferior (LHV) más alto para distintos tipos de biomasa en función de la relación de equivalencia (ER), destacando cáscara de cacao, cascarilla de café y bagazo de caña panelera. La cáscara de cacao exhibe un LHV de aproximadamente 0.33 MJ/m^3 con un ER de 0.28, lo que indica una conversión altamente eficiente de biomasa en syngas de alta densidad energética. Por otro lado, la cascarilla de café muestra un LHV menor, alrededor de 0.26 MJ/m^3 con un ER de 0.2, sugiriendo una menor eficiencia energética en la producción de syngas. El bagazo de caña panelera

presenta un LHV intermedio de cerca de 0.28 MJ/m^3 con un ER de 0.2. Un LHV elevado implica una mayor eficiencia energética y viabilidad económica del proceso de gasificación, proporcionando más energía por unidad de volumen de syngas y optimizando su utilización en aplicaciones industriales de alta demanda energética. Estos resultados evidencian la importancia de seleccionar biomásas con altos valores de LHV y ajustar las condiciones operativas del proceso de gasificación para maximizar el rendimiento energético del syngas.

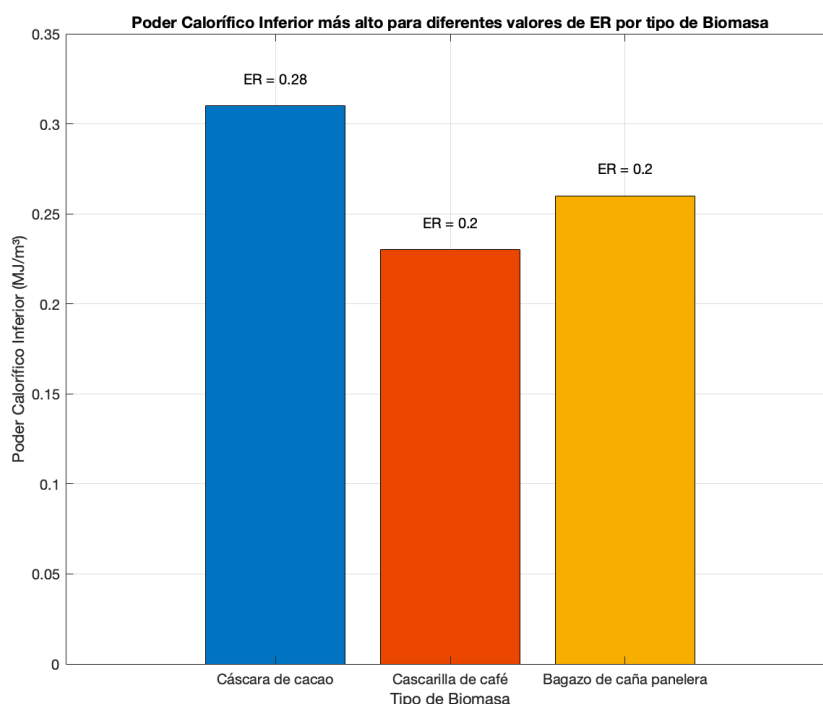


Figura 29. Valores máximos del LHV para valores de ER por tipo de biomasa residual. Fuente: Elaboración propia.

Se muestra en la Figura 30 la eficiencia de conversión de gas (CGE) para diferentes tipos de biomasa, incluyendo cáscara de cacao, cascarilla de café y bagazo de caña panelera. La cáscara de cacao presenta la CGE más alta, alrededor del 11 %, lo que indica una conversión más eficiente de biomasa en syngas, probablemente debido a su alto contenido de carbono y propiedades fisicoquímicas favorables. En contraste, la cascarilla de café exhibe la CGE más baja, cercana al 7 %, sugiriendo limitaciones en la conversión energética posiblemente atribuibles a su menor contenido de carbono y otras características inherentes de la biomasa. El bagazo de caña panelera muestra una CGE intermedia de aproximadamente 9 %, reflejando una eficiencia de conversión moderada. La CGE es un indicador crítico para evaluar la viabilidad y eficiencia de la producción de syngas.

Se presenta en la Figura 31 la producción de energía eléctrica máxima (en kW) derivada de la gasificación de diferentes biomásas mediante tecnología de combustión en ciclo de vapor. La cáscara de cacao demuestra un potencial sobresaliente con una producción de 10,489.49 kW, significativamente superior en comparación con la cascarilla de café (95.12 kW) y el bagazo de caña panelera (350.00 kW). Esta alta capacidad de generación eléctrica de la cáscara de cacao puede atribuirse a su alto contenido energético y eficiencia de conversión, haciendo de esta biomasa una opción altamente viable para la producción de energía a gran escala. La notable diferencia en la salida de energía eléctrica entre las distintas biomásas determina la importancia de seleccionar materias primas con altos valores caloríficos y eficiencia de conversión para optimizar la viabilidad económica y

técnica de los sistemas de generación de energía basados en la combustión en ciclo de vapor. La capacidad de la cáscara de cacao para generar energía eléctrica a gran escala podría posicionarla como un recurso estratégico en proyectos de energía renovable

y sostenibilidad energética, mientras que las otras biomasas, aunque menos eficientes, aún ofrecen oportunidades para aplicaciones a menor escala o con optimización adicional del proceso.

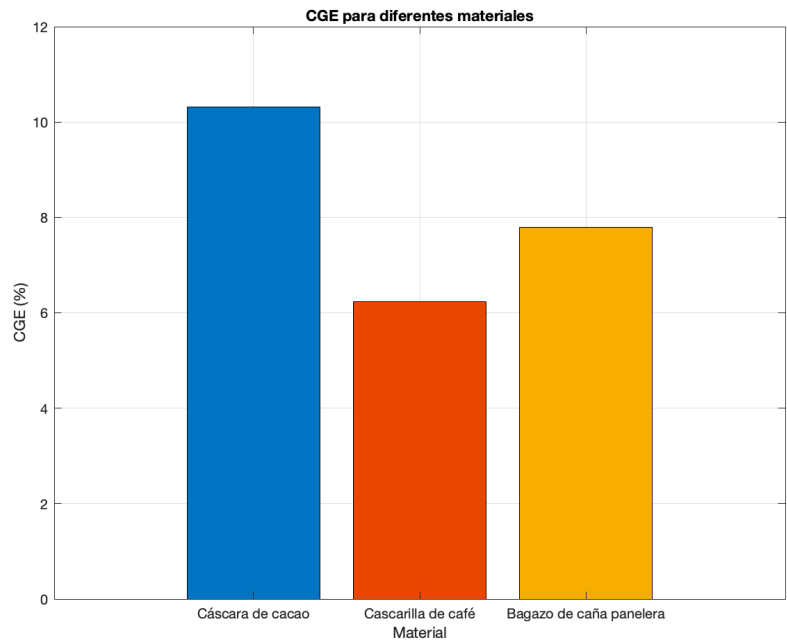


Figura 30. Valores máximos del CGE para valores de ER por tipo de biomasa residual. Fuente: Elaboración propia.

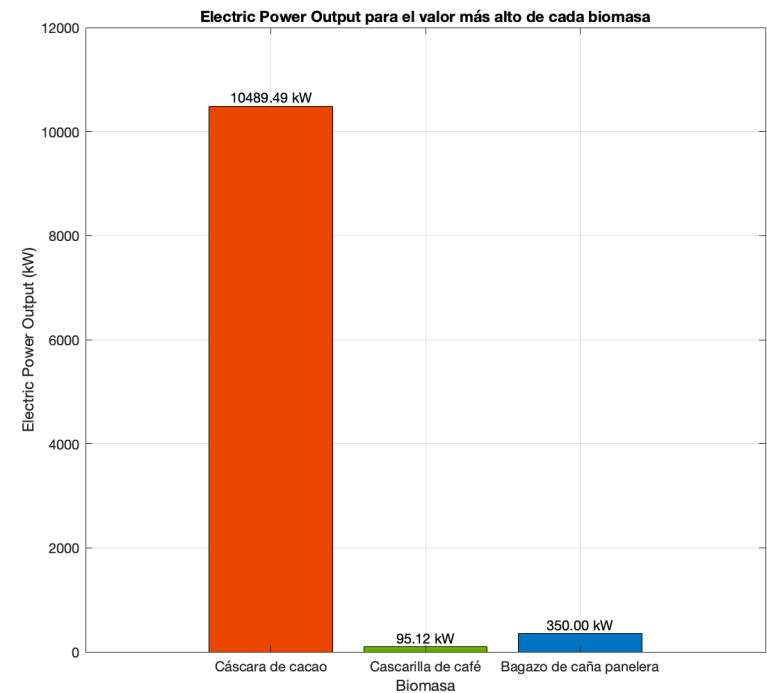


Figura 31. Valores máximos de la viabilidad de conversión de energía por tipo de biomasa residual. Fuente: Elaboración propia.

4. Conclusiones.

Este artículo presenta un modelo de equilibrio termodinámico estequiométrico para comprender el proceso de gasificación en un gasificador de lecho fijo downdraft, incorporando una reacción global que incluye todas las especies gaseosas y los rendimientos de alquitrán y carbón, siendo este último determinado mediante la implementación de la reacción de Boudouard. Además, la temperatura de gasificación se determina a través de la solución de un conjunto de ecuaciones completamente acopladas, lo que resulta en un solucionador con propiedades de convergencia mejoradas.

Los resultados destacan diferencias significativas en la viabilidad energética de las distintas fuentes de biomasa estudiadas. Por ejemplo, el bagazo de caña panelera demostró tener el mayor potencial energético técnico debido a su abundancia y alto poder calorífico, lo que lo convierte en una opción preferencial para la producción de energía a gran escala en la región.

La composición química intrínseca de cada tipo de biomasa influye notablemente en los resultados de la gasificación. Las variaciones en el contenido de elementos como el carbono, hidrógeno y oxígeno determinan la calidad del syngas y el rendimiento energético, subrayando la necesidad de caracterizaciones detalladas previas a la selección del material para la gasificación.

La implementación de tecnologías de gasificación termoquímica mostró ser una vía efectiva para convertir la biomasa residual en energía renovable. Los resultados indicaron que ajustar la relación de equivalencia (ER) y la temperatura de operación podría optimizar la producción de syngas de alta calidad, con alto poder calorífico y rendimiento energético.

La gasificación de cáscara de cacao a un ER de 0.28 maximiza la producción de hidrógeno (~70 %), lo cual es crucial para la eficiencia del proceso y sus aplicaciones industriales. Este estudio demuestra que optimizar el ER es esencial para cada tipo de biomasa, ya que la cascarilla de café y el bagazo de caña panelera presentan variaciones significativas en la producción de H_2 y CO según el ER. La calidad del syngas, medida en términos de concentración de H_2 y CO, es determinante para aplicaciones energéticas eficientes, destacando la necesidad de ajustar el ER de manera precisa para cada biomasa específica.

El balance de energía del proceso de gasificación revela una tendencia decreciente con el aumento de la temperatura, indicando que el proceso se vuelve más exergónico a temperaturas elevadas. Este

comportamiento evidencia la importancia de controlar adecuadamente las condiciones operativas para evitar pérdidas excesivas de energía y maximizar la eficiencia del proceso. En particular, se destaca que la temperatura óptima para el balance de energía se encuentra alrededor de 1,373.15 K. Ajustar y mantener esta temperatura es importante para optimizar la eficiencia energética y asegurar la sostenibilidad del proceso de gasificación de biomasa. Estos hallazgos proporcionan una guía valiosa para el diseño y operación de sistemas de gasificación, enfatizando la necesidad de un control preciso de las condiciones operativas para mejorar la viabilidad económica y la eficiencia global del proceso.

La cáscara de cacao demuestra un potencial significativo en la producción de energía eléctrica a partir del syngas mediante un ciclo de vapor, alcanzando un pico de 10,439.49 kW a un ER de 0.3. En comparación, la cascarilla de café y el bagazo de caña panelera también muestran potencial de generación eléctrica, aunque a niveles considerablemente menores. Estos resultados subrayan la importancia de optimizar la relación de equivalencia (ER) para maximizar la eficiencia del proceso de gasificación y la producción de energía. La variación en los rendimientos eléctricos entre las diferentes biomásas enfatiza la necesidad de un enfoque adaptativo y específico para cada tipo de biomasa, asegurando así la eficiencia y viabilidad económica del proceso de gasificación en aplicaciones energéticas sostenibles.

La selección de la biomasa adecuada y la optimización de las condiciones de operación, como la relación de equivalencia (ER), son esenciales para maximizar la eficiencia y la viabilidad económica del proceso de gasificación. Desarrollar estrategias energéticas que integren las características específicas de cada tipo de biomasa y las particularidades regionales maximiza tanto los beneficios energéticos como económicos. Este enfoque adaptativo asegura que se aproveche al máximo el potencial energético de la biomasa residual, contribuyendo a la economía circular y a la eficiencia de las aplicaciones energéticas en diversos contextos.

5. Agradecimientos.

Los autores desean agradecer al Centro de Desarrollo Tecnológico CREATIC, al Tecnoparque del SENA nodo Popayán y a la Universidad Federal de Itajubá, en particular al Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída, por los análisis de laboratorio desarrollados y la asesoría técnica brindada.

6. Referencias.

- [1] Alao, M. A., Popoola, O. M., & Ayodele, T. R. (2022). Waste-to-energy nexus: An overview of technologies and implementation for sustainable development. *Cleaner Energy Systems*, 3, 100034. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2022.100034>
- [2] Díaz González, C. A., De Oliveira, D. C., Yepes, D. M., Pacheco, L. E., & Silva, E. E. (2023). Aspen Plus model of a downdraft gasifier for lignocellulosic biomass adjusted by Principal Component Analysis. *Energy Conversion and Management*, 296, 117570. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117570>
- [3] Verma, S., Dregulo, A. M., Kumar, V., Bhargava, P. C., Khan, N., Singh, A., Sun, X., Sindhu, R., Binod, P., Zhang, Z., Pandey, A., & Awasthi, M. K. (2023). Reaction engineering during biomass gasification and conversion to energy. *Energy*, 266, 126458. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126458>
- [4] Güleç, F., & Okolie, J. A. (2024). Decarbonising bioenergy through biomass utilisation in chemical looping combustion and gasification: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 22(1), 121-147. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01656-5>
- [5] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) & Universidad de los Andes. (2023). Resultados: Pacto Educativo para la Planeación Energética en Colombia y la Transición Energética Justa. Atlas de Biomasa residual para la identificación de palma de aceite en el territorio nacional
- [6] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2024). Sistema de Información Eléctrico Colombiano (SIEL)[Dashboard]. ArcGIS. <https://upme.maps.arcgis.com/apps/dashboards/728d00e4df6746e2bca50b4023a82ce3>
- [7] Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA). (2023). Evaluaciones agropecuarias municipales: Base agrícola 2019-2023. Colombia: Potencia de la Vida.
- [8] Mosquera, C. L. (2023). Aprovechamiento de la biomasa residual como fuente de energía renovable en Colombia: escenario de gasificación potencial. *Palmas*, 44(1), 49-61. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/13997/13869>
- [9] Serrato Monroy, C. C., & Lesmes Cepeda, V. (2016). Metodología para el cálculo de energía extraída a partir de la biomasa en el Departamento de Cundinamarca. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Ingeniería, Proyecto Curricular Ingeniería Eléctrica. Bogotá, Colombia.
- [10] Basu, P. (2013). Biomass gasification, pyrolysis, and torrefaction: Practical design and theory (2nd edition). Academic Press.
- [11] Mendiburu, A. Z., Carvalho, J. A., & Coronado, C. J. R. (2014). Thermochemical equilibrium modeling of biomass downdraft gasifier: Stoichiometric models. *Energy*, 66, 189-201. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.022>
- [12] Mendiburu, A. Z., Carvalho, J. A., & Coronado, C. J. R. (2014). Thermochemical equilibrium modeling of biomass downdraft gasifier: Stoichiometric models. *Energy*, 66, 189-201. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.022>
- [13] La Villetta, M., Costa, M., & Massarotti, N. (2017). Modelling approaches to biomass gasification: A review with emphasis on the stoichiometric method. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 71-88. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.027>
- [14] Ibrahim, A., Veremieiev, S., & Gaskell, P. H. (2022). An advanced, comprehensive thermochemical equilibrium model of a downdraft biomass gasifier. *Renewable Energy*, 194, 912-925. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.069>
- [15] Yepes Maya, D. M., Silva Lora, E. E., Andrade, R. V., Ratner, A., & Martínez Angel, J. D. (2021). Biomass gasification using mixtures of air, saturated steam, and oxygen in a two-stage downdraft gasifier. Assessment using a CFD modeling approach. *Renewable Energy*, 177, 1014-1030. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.051>