

**CARACTERIZACIÓN DE RENDIMIENTOS DE GENERACIÓN DE
BIOCOMBUSTIBLES A PARTIR DE LA CONVERSIÓN TERMOQUÍMICA DE
CASCARILLA DE ARROZ, CASCARA DE COCO Y FIBRA DE COCO; EN UN
MICROGASIFICADOR DE BIOMASA**

**SAMIR ENRIQUE HERNÁNDEZ ORREGO
CRISTIÁN DAVID PÉREZ NEGRETTE**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
MONTERÍA
2022**

**CARACTERIZACIÓN DE RENDIMIENTOS EN GENERACIÓN DE
BIOCOMBUSTIBLES A PARTIR DE LA CONVERSIÓN TERMOQUÍMICA DE
CASCARILLA DE ARROZ, CASCARA DE COCO Y FIBRA DE COCO; EN UN
MICROGASIFICADOR DE BIOMASA**

**SAMIR ENRIQUE HERNÁNDEZ ORREGO
CRISTIÁN DAVID PÉREZ NEGRETTE**

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero mecánico

Director

Ing. Rafael David Gómez Vásquez. PhD

Codirector

Ing. Diego Alejandro Camargo Trillos. PhD

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
MONTERÍA
2022**

12 de diciembre de 2022

SAMIR ENRIQUE HERNÁNDEZ ORREGO
CRISTIÁN DAVID PÉREZ NEGRETTE

“Declaro que este trabajo de grado no ha sido presentado con anterioridad para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o en cualquiera otra universidad”. Art. 92, párrafo, Régimen Estudiantil de Formación Avanzada

Firma del autor (es)

Samir Hernandez O.
Samir Enrique Hernández Orrego

Cristian Perez Negrette
Cristián David Pérez Negrette

Dedicatoria

Yo, Cristian David, quiero empezar esta dedicatoria agradeciendo a Dios por todo lo que me ha dado a lo largo de los años, por permitirme culminar esta tesis con éxito. A mi madre Luz Estela Negrette, la persona más importante en mi vida y quien ha sido mi más grande apoyo no solo económico sino emocional.

A mis tutores de Tesis, los ingenieros Rafael Gómez y Diego Camargo por su orientación, dirección y valiosos conocimientos que fueron fundamental para alcanzar los objetivos trazados en la presente tesis. Así mismo, a mi compañero de tesis, Samir Hernández Orrego, por todos los retos que tuvimos que enfrentar en la realización de nuestra tesis y por sus aportes valiosos a esta. Finalmente, a mi familia y a todas las personas que han contribuido en mi crecimiento como persona y profesional, que de una u otra manera me han llevado a convertirme en lo que hoy soy.

Yo, Samir Hernández Orrego, en primera instancia deseo expresar mi agradecimiento a los directores de tesis, Dr. Rafael Gómez y Dr. Diego Camargo por el apoyo y dedicación brindada a lo largo de este trabajo, a su vez por el respeto a sugerencias e ideas, gracias por la confianza depositada. De igual manera mis mas sinceros agradecimientos a la Ingeniera María Londoño por su amabilidad, disposición a servir, e ideas para la contribución de este proyecto.

Gracias a mis hermanas y amigos, pero en especial, a mis padres por la paciencia, comprensión y apoyo incondicional a lo largo de mi carrera. Sin su apoyo este trabajo nunca habría sido escrito, y por eso, este trabajo también es de ellos.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	8
Abstract.....	9
1. Introducción	10
2. Objetivos	13
2.1. Objetivo General.....	13
2.2. Objetivos Específicos	13
3. Marco teórico	14
3.1. Biomasa	14
3.2. Cascarilla de Arroz	15
3.3. Residuos del cultivo de Coco.....	16
3.4. Gasificación	17
3.5. Pirólisis	18
3.6. Gasificador de tiro descendente (Downdraft).....	18
3.7. Gas de síntesis (Syngas)	19
3.8. Biocarbón (Biochar)	19
3.9. Bioaceite	20
4. Estado del arte	21
5. Metodología	36
5.1. Inspección y adecuación del reactor	36
5.2. Preparación de la biomasa	38
5.3. Procesos de pirólisis y gasificación	40
5.4. Balance de masa de la conversión termoquímica	42
6. Resultados	45
7. Conclusiones	49
8. BIBLIOGRAFÍA.....	50

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Consumo de Energía para el año 2019.....	11
Tabla 2: Análisis gravimétrico de la ceniza de cascarilla de arroz (CCA).....	22
Tabla 3: Comparación muestra estándar vs mejor mezcla de concreto experimental.....	22
Tabla 4: Composición química de CCA, pretratada por 4 horas.....	24
Tabla 5: Compuestos del bio aceite obtenido por pirólisis rápida de cáscara de coco.....	25
Tabla 6: Condiciones experimentales de las pruebas	26
Tabla 7: Análisis último y próximo de los desechos de cáscara de coco	28
Tabla 8: Factores y Niveles de procesos	29
Tabla 9: Resultados de los procesos de pirolisis	29
Tabla 10: Poder calorífico de las muestras de biomasa.....	32
Tabla 11: Análisis próximo y último de Caña de Maíz y Cáscara de Coco	32
Tabla 12: Propiedades físico químicas del Bio aceite	33
Tabla 13: Parámetro de Rendimiento del Gasificador de Tiro Descendente Abierto	34
Tabla 14: Composición elemental del gas de síntesis obtenido en cada proceso.....	45
Tabla 15: Poder Calorífico Inferior (PCI) de cada proceso.....	46
Tabla 16: Resultados del Balance de Masa (%)	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Gasificador de lecho fijo descendente (Downdraft)	19
Figura 2: Parámetros de rendimientos en función de RE	27
Figura 3: Efecto del PH de biomasa en la composición del gas productor y LHV	34
Figura 4: Reactor de lecho fijo downdraft.....	37
Figura 5: Adecuación del gasificador	38
Figura 6: Horno eléctrico.....	39
Figura 7: Mezclado de cáscara y fibra de coco	39
Figura 8: Encendido parcial del micro gasificador.....	40
Figura 9: Cromatógrafo Sigma.....	41
Figura 10: Biocarbón y Bioaciete.....	41
Figura 11: Biocarbón producto del proceso de pirolisis.....	42
Figura 12: Esquema de balance de masa	42
Figura 13: Poder Calorífico Inferior de cada proceso	46
Figura 14: Porcentaje de CO, H ₂ y CH ₄ por proceso.....	47

Resumen

Este trabajo de investigación propone el estudio de los compuestos obtenidos de la pirólisis y gasificación de los residuos de cultivo de coco (cáscara y fibra) y de la cascarilla de arroz, mediante pruebas realizados en un reactor de lecho fijo con corriente paralela (Downdraft) de pequeña escala. El objetivo principal del estudio radica en caracterizar los rendimientos de generación de gas de síntesis, biochar y bioaceite de la conversión termoquímica de los residuos mencionados; analizando la composición elemental del gas producido, su poder calorífico inferior, los flujos másicos de cada uno de los componentes involucrados en el balance de masa y la eficiencia del gasificador. En los resultados se encontró que el valor del poder calorífico inferior más alto, se obtuvo en el proceso de gasificación de los residuos de coco, siendo el 57.9% del PCI de la muestra patrón. También se encontró que el proceso de gasificación de los residuos de coco generó mayor proporción de CO, H₂ y CH₄ en el gas síntesis que el producido con la cascarilla de arroz. Se pudo concluir que a pesar de que la producción de metano fue mayor al obtenido en la muestra patrón, se evidencia la disminución de las emisiones de estos gases con la implementación de los procesos de conversión termoquímica de biomásas.

Palabras claves: Conversión termoquímica, pirólisis, gasificación, residuos de coco, cascarilla de arroz.

Abstract

This research work proposes the study of the compounds obtained from the pyrolysis and gasification of coconut crop residues (shell and fiber) and rice husk, through tests carried out in a fixed bed reactor with parallel current (Downdraft) of small scale. The main objective of the study lies in characterizing the generation yields of synthesis gas, biochar and biooil from the thermochemical conversion of the mentioned residues; analyzing the elemental composition of the produced gas, its lower calorific value, the mass flows of each of the components involved in the mass balance and the efficiency of the gasifier. In the results it was found that the value of the highest lower calorific value was obtained in the gasification process of the coconut residues, being 57.9% of the PCI of the standard sample. It was also found that the gasification process of coconut residues resulted in a higher proportion of CO, H₂ and CH₄ in the gas synthesis than that produced with rice husks. It was possible to conclude that despite the fact that the methane production was higher than that obtained in the standard sample, the decrease in the emissions of these gases is evident with the implementation of biomass thermochemical conversion processes.

Keywords: Thermochemical conversion, pyrolysis, gasification, coconut residues, rice husk.

1. Introducción

Los procesos de conversión termoquímica se han convertido, a través de los años, en una de las tecnologías más favorables para el aprovechamiento de los recursos energéticos obtenidos de la biomasa residual. Desde tiempos de la primera guerra mundial, personas interesadas por el desarrollo de nuevas tecnologías, descubrieron la manera de usar gasificadores de corriente descendente (Downdraft) para convertir biomasa y carbón vegetal, en compuestos capaces de poner en marcha generadores eléctricos de baja capacidad y, hacer funcionar motores de barcos, trenes y otros vehículos (N. Fonseca, 2003). Ya en la segunda guerra mundial, Alemania bloquea el transporte de combustible fósiles a otros países de Europa, dando como prioridad, el uso prioritario del petróleo para actividades de carácter militar; lo que indujo a la utilización de gasificadores de biomasa para la generación de su propia energía por parte de la población afectada (Reed & Das, 1988).

Consecutivamente, para la época de los setenta, se presentó un incremento en los precios de los combustibles a base de hidrocarburos, lo que provocó un alto interés en la utilización de materia prima residual como recurso alternativo para la generación de energía. Por lo anterior y, por las experiencias ya vividas en otras décadas, se desarrollaron planes enfocados en el perfeccionamiento de técnicas para la generación de alternativas que produjeran combustibles renovables con los que se mitigaran, además, los efectos adversos causados por los combustibles fósiles al medio ambiente (L. García, 2011).

Por otra parte, a nivel mundial se conoce la problemática de los recursos fósiles, recursos de gran demanda no renovables, que emiten gases de efecto invernadero perjudiciales para el medio ambiente (Wang et al., 2017). Para el 2015, el petróleo se posiciono como la fuente energética más importante con un 33,2% de participación mundial y, un promedio de consumo diario de 91.300 millones de barriles; seguido por el consumo de carbón y gas natural (*International - U.S. Energy Information Administration (EIA)*, 2015). En la **Tabla 1**, se observa una clasificación de los 10 países con mayor consumo de energía generada a partir de combustibles fósiles. Por lo anterior, se le ha venido dando importancia al uso de materias

primas renovables como la biomasa residual agroindustrial, materia capaz de generar un impulso energético sostenible (Cai et al., 2017); la cual se considera como uno de los recursos renovables con más abundancia a nivel mundial y una alternativa promisoriosa y amigable con el medio ambiente, para ser aplicada como material energético (Torres-Álvarez & Peña-Cortés, 2011) y en otras aplicaciones como material sólido, líquido y gaseoso (Barco, 2015).

Tabla 1:

Consumo de Energía para el Año 2019

Ranking	País	Btu (Cuatrillón)
1	China	132.591
2	Estados Unidos	101.437
3	Rusia	64.281
4	Arabia Saudita	27.861
5	Canadá	23.517
6	Australia	18.851
7	India	17.785
8	Indonesia	17.059
9	Irán	16.085
10	Brasil	12.713

Nota. Fuente: (International - U.S. Energy Information Administration (EIA))

Existen varios procesos y técnicas con los que se consigue convertir la biomasa residual para su uso energético. Uno de los procesos más destacados por su eficiencia es el de conversión termoquímica, el cual descompone la biomasa aplicando altas temperaturas y/o agentes de oxidación, los cuales reaccionan con los componentes obtenidos para aumentar su poder calorífico (L. García, 2011). Los procesos de conversión termoquímica se clasifican dependiendo de las condiciones de presión y temperatura a la que sea sometida la biomasa, dentro de los cuales se encuentra: la combustión, la licuefacción, la gasificación y la pirolisis (Barco, 2015). Para el desarrollo de esta investigación, se estudiarán las técnicas de gasificación y pirolisis, ejecutadas en un gasificador de tiro descendente (Downdraft) de baja escala; debido a su simplicidad, a las altas temperaturas de salida del gas, su fácil

configuración para ser utilizado con distintas biomásas y la producción de gas libre de alquitranes (Susastriawan et al., 2017).

Colombia es un país con un alto potencial en la obtención de material alternativo para la producción de combustibles renovables, ya que posee diversidad de biomasa residual procedente de las industrias agrícolas, tales como: arroz, maíz, café, palma; entre otras (Corpoema, 2010; Patiño, 2014). Para esta investigación se estudiarán los residuos de la producción de arroz (Cascarilla de arroz) y de coco (Fibra y Cascara de coco) del departamento de Córdoba; zona que posee un volumen alto en producción de arroz, siendo La Doctrina, un corregimiento del municipio de Lorica, una de las tierras más productivas con una siembra de 828 hectáreas (ha) con un promedio de 5,1 ton/ha (FEDEARROZ, 2021). De igual manera, se tiene que el departamento de Córdoba para el año 2019, según el Ministerio de Agricultura (Minagricultura), fue el principal productor de coco en el Caribe Colombiano, con 2.114 hectáreas sembradas y una producción de 16.134 toneladas al año (Minagricultura, 2019).

Siendo coherentes con lo expuesto, este trabajo de investigación propone el estudio de los compuestos obtenidos de la conversión termoquímica de residuos que actualmente están siendo desaprovechados en la región, como lo son: cascarilla de arroz, cascara y fibra de coco. Aparece entonces, la oportunidad de utilizar un gasificador de tiro invertido o descendente (Downdraft) de pequeña escala, para el estudio de los compuestos que se obtendrán en el mismo.

Dicho lo anterior, el estudio de las técnicas de gasificación y pirólisis en condiciones normales y reales de operación para la conversión termoquímica de las biomásas mencionadas, puede generar valiosos conocimientos de las características de los compuestos que se obtendrán en la puesta en marcha de esta investigación. Por tanto, el objetivo de este trabajo, es caracterizar los rendimientos de generación de gas de síntesis, biochar y bioaceite de la conversión termoquímica de cascarilla de arroz, fibra de coco y cascara de coco; en un micro gasificador de biomasa downdraft a escala de laboratorio.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Caracterizar los rendimientos de generación de gas de síntesis, biochar y bioaceite de la conversión termoquímica de cascarilla de arroz, cascara de coco y fibra de coco; en un micro gasificador de biomasa.

2.2. Objetivos Específicos

- Ajustar los parámetros operativos del micro gasificador en función de las temperaturas, características de la biomasa y agente gasificante.
- Validar las mediciones de los campos de gas y biochar en tiempo real en un micro gasificador de biomasa.
- Caracterizar los parámetros de rendimiento en los productos de la gasificación y pirolisis empleando cascarilla de arroz, cascara y fibra de coco como materia prima.

3. Marco teórico

3.1. Biomasa

La biomasa es considerada como toda materia orgánica que no tiene ningún aporte nutricional en productos de consumo humano; sin embargo, con los años se han venido disponiendo para la generación de combustibles alternativos. En términos generales, todo residuo generado a partir de los recursos agrícolas, forestales, animales; entre otros, son caracterizados como tipos de biomasa residual sólida (Jenkins et al., 1998). Su producción tiene origen en los procesos biológicos, lo que indica que su poder calorífico proviene del sol (A. Kumar et al., 2015). Su estructura es una mezcla de carbono, hidrógeno, oxígeno y pequeños niveles de nitrógeno y azufre; está compuesta principalmente de tres materiales poliméricos: celulosa, hemicelulosa y lignina (D. Castro, 2018).

La utilización de la biomasa residual ha generado gran interés entre los investigadores a nivel mundial al relacionarla como potencial alternativa energética y un alivio al impacto ambiental que han generado los combustibles fósiles (Titiloye et al., 2013). Ceotto et al. (Ceotto et al., 2010), utilizaron la biomasa como fuente de energía agroindustrial en la búsqueda de posibles soluciones de tres problemas que se han venido presentando a nivel global: la minimización de las emisiones de gases que afectan al medio ambiente, la alternancia de las fuentes energéticas con el fin de mermar el uso de combustibles péticos y, la identificación de fuentes alternativas que generen valor agregado a las actividades productivas de los cultivadores. Igualmente, Roselló et al. (Roselló et al., 2017), implementaron la transformación termoquímica de los desechos del cultivo de arroz con el objetivo de obtener materia prima para uso potencial en la construcción, minimizando la contaminación ambiental por la quema a campo abierto y la emisión de metano (CH₄) producido por su degradación orgánica.

Básicamente la biomasa se clasifica en tres tipos: natural o primaria, residual o secundaria y producida o terciaria; dependiendo de la forma en que ésta se genere. La primera es producida

de forma directa por medio de la fotosíntesis, incluyendo cada una de las plantaciones que son usadas para alimentación, pasto seco, fibra y combustión; básicamente es aquella que se consigue directamente de la cosecha o se acopia del campo donde se siembra. La biomasa residual es la identificada como el desecho o residuo de las industrias de alimentos, madereras, textiles; entre otras. Este tipo de biomasa difiere de la natural, ya que es obtenido como subproducto de los procesos a los que los humanos procesan industrialmente las biomásas primarias (Giraldo, 2012). El tercer tipo encierra los desechos o desperdicios de los productos fabricados de la materia prima natural luego de ser consumidos. Ejemplo de este tipo de biomasa son los desperdicios sólidos municipales (Perlack et al., 2005).

Entre las biomásas agrícolas figuran algunas con mucho interés en la generación de fuentes energéticas. Hiloidhari et al. (Hiloidhari et al., 2014), identificaron residuos agrícolas que se producen en distintas actividades agroindustriales, los cuales fueron clasificados en seis categorías: cereales (cascarilla de arroz, mazorca de maíz, vaina de trigo, paja de cebada), plantas oleaginosas (cáscara de soja, rebrote de maní y la mostaza), legumbres (lenteja, girasol), cultivo de caña de azúcar (bagazo y hojas), hortícolas (cáscara de plátano, residuos de coco) y otros (residuos del cultivo de algodón y yute).

La biomasa como fuente energética se puede usar de manera directa sin ser sometida a ningún proceso o de forma indirecta al ser sometida a transformaciones térmicas con ausencia de oxígeno con el objeto de obtener biocombustibles en estado sólido, líquido y gaseoso; es decir, en biocarbón, bioaceite y gas de síntesis. De igual manera, su conversión termoquímica no favorece al incremento del calentamiento global, puesto que es mínima la generación de nitrógeno y azufre en esta clase de procesos termoquímicos; especialmente en la pirólisis y en la gasificación (D. Castro, 2018).

3.2. Cascarilla de Arroz

La cascarilla de arroz (CA) es un residuo agrícola enmarcado en la categoría de cereales, es una fibra que envuelve y protege el grano de arroz de microorganismos y otras fuentes de

contaminación; está compuesta por elementos como celulosa y sílice, los cuales son valiosos a la hora de obtener un buen comportamiento como combustible. Debido a su alto contenido energético, la cascarilla de arroz se ha convertido en un material alternativo para la producción de energía, figurando como una contribución a la conservación de las riquezas naturales y al desarrollo de nuevas tecnologías que aportan valor agregado a la producción de arroz.(Valverde et al., 2007).

Según Sierra (Sierra, 2009), la cascarilla de arroz representa un promedio del 20% en masa del grano y su poder calorífico está alrededor de los 16,72 MJ/-kg; tiene forma ondulada y superficie de aspecto irregular, su longitud se encuentra entre los 5 y 11 mm teniendo en cuenta la variedad. Está compuesta en promedio por 34,4% de celulosa, 24,3% de hemicelulosa y un 19,2% de lignina. Su composición elemental está constituida por 37,05% de carbono, 8,80% de hidrógeno, 11,06% de nitrógeno, 35,05% de oxígeno y 9,01% de silicio (Díaz, 2019).

3.3. Residuos del cultivo de Coco

La fibra de coco es una capa gruesa compuesta por un contenido alto en lignina y bajo de celulosa, lo que la convierte en un material con buena resistencia y dureza; además, contiene hemicelulosa que le proporciona capacidad de absorción y retención de humedad. Cada fruto puede producir aproximadamente 125 gramos de fibra (Toj, 2008). Se caracteriza por ser una de las fibras naturales más duras, baja conductividad y son resistentes a las bacterias y a la humedad. La fibra hace parte del 35% de los materiales que componen el fruto, después de secarse obtiene un color café y su tamaño varía entre los 15 y 25 cm (Escudero & Aristizabal, 2012), posee un poder calorífico de 14,7 MJ/kg (Laib, 2017). La fibra de coco debe ser identificada y escogida por la madurez del fruto, puesto que a medida que se madura el fruto, la fibra va tornándose café y su rigidez aumenta debido a la lignina contenida en su estructura; mientras que la fibra verde es más apta a daños por microorganismos ocasionados por su alto contenido de humedad (García, 2015).

La cáscara es otro de los residuos agrícolas generados del fruto de coco, identificada como fibra natural compuesta por 36% de celulosa, 25% de hemicelulosa y 28% de lignina (Obokparo, 2020); compone el 15 % del fruto y tiene un poder calorífico con mayor valor que la fibra (23,01 MJ/kg). Teniendo en cuenta que este residuo es descartado en su totalidad, se podría utilizar como biomasa residual para la generación de alternativas energéticas sin perjudicar la seguridad alimentaria de los consumidores (Laib, 2017).

3.4. Gasificación

La gasificación es un proceso de conversión termoquímica que transforma la biomasa sólida en combustible por medio de la aplicación de altas temperaturas y en presencia de un agente oxidante que puede ser: aire, dióxido de carbono, hidrógeno, oxígeno, vapor de agua o mezclas proporcionadas entre estos (Barco, 2015). La composición química del combustible producido durante el proceso, está sujeta a las propiedades físicas y químicas de la materia residual, al agente oxidante que se utilice y a los parámetros de operación del equipo gasificador como: la temperatura, presión, velocidad de calentamiento; entre otros. El proceso de gasificación con aire como agente oxidante genera gases ricos en monóxido de carbono y metano; mientras que, el uso de oxígeno genera gases más limpios y con un poder calorífico mayor. La adición de vapor de agua en el proceso, se utiliza principalmente para producir composiciones de dióxido de carbono e hidrógeno (Márquez, 2012).

La gasificación de biomasa se realiza en un equipo gasificador. El desarrollo del proceso está dado bajo la condición de cuatro ciclos. El primer ciclo es el secado de la biomasa que busca la eliminación del contenido de humedad del material a temperaturas por encima de los 100°C. El segundo ciclo es la pirólisis en la que se da la ruptura de las moléculas de la materia generando material volátil, residuos ricos en carbón y alquitranes (Márquez, 2012). El tercero es la combustión, donde el dióxido de carbono y el vapor de agua generados en el primer ciclo, reaccionan con el material carbonoso de la pirólisis para producir gases. El último ciclo es la gasificación del material carbonoso pesado al aplicarse el agente oxidante, haciendo que

este libere calor y genere el gas de síntesis. Este último ciclo es la continuación del segundo aplicando temperaturas por encima de los 700°C (Osorio, 2019).

3.5. Pirólisis

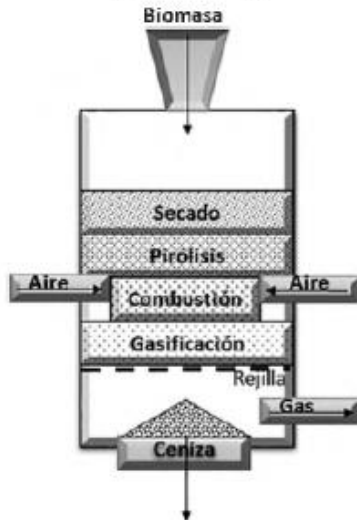
El proceso de pirólisis es una técnica de transformación termoquímica que consiste en degradar o convertir térmicamente la biomasa sin la presencia de agentes oxidantes; produciendo materiales energéticos como: gas de síntesis, biocarbón y bioaceite (Chen et al., 2015). Este proceso se implementa bajo condiciones atmosféricas de gas inerte, los cuales son: Neón (Ne), Argón (Ar), Nitrógeno (N₂), Helio (He), Dióxido de Carbono (CO₂); entre otros. El rango de temperatura, la presión, el tamaño de la biomasa, la tasa de calentamiento, el tiempo de residencia, el flujo de gas inerte; son algunos de los parámetros más relevantes en la realización de este tipo de procesos termoquímicos, con los cuales se generaría productos con alto contenido energético que podrían convertirse en potenciales generadores de energía (D. Castro, 2018). La pirólisis es un proceso fundamental que da paso a la gasificación en una zona comprendida entre los 300 °C y 650°C (Abnisa et al., 2013).

3.6. Gasificador de tiro descendente (Downdraft)

Los gasificadores se clasifican de acuerdo a la forma en que interactúan el agente oxidante el material residual en el interior del equipo (Osorio, 2019). Los gasificadores downdraft o de lecho fijo descendente, son aquellos en los que el agente gasificador y la biomasa interrelacionan en una sola trayectoria de entrada. En este tipo de gasificador, el gas se produce luego de pasar por ciclos donde se aplican altas temperaturas, lo que favorece a la reducción de partículas contaminantes (alquitrán) (Peña et al., 2017). En la **Figura 1** se ilustra un gasificador tipo downdraft.

Figura 1:

Gasificador de Lecho Fijo Descendente (Downdraft)



Nota. Fuente: (Peña et al., 2017)

3.7. Gas de síntesis (Syngas)

El syngas es el combustible en estado gaseoso resultante de la gasificación de biomasa compuesto principalmente por: monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H₂), metano (CH₄), nitrógeno (N₂) y dióxido de carbono (CO₂); esta composición está sujeta a los parámetros de operación del gasificador y al agente oxidante empleado (Osorio, 2019).

3.8. Biocarbón (Biochar)

El biocarbón es un material carbonoso que se produce por medio de la aplicación de calor a la biomasa residual en ausencia total o parcial de oxígeno. El proceso de conversión termoquímica más empleado para producir biochar es la pirólisis; aunque también es producido en los ciclos de combustión y gasificación (Priya et al., 2020).

3.9. Bioaceite

El bioaceite es la porción líquida obtenida de la transformación termoquímica de la biomasa residual. El bioaceite se diferencia de los combustibles fósiles tanto por su composición como por sus propiedades físicas y químicas. Sus principales características deben tenerse en cuenta a la hora de ser aplicado como biocombustible o para otra aplicación alternativa; puesto que son materia prima inestable, ácidas y con un alto volumen de humedad (Fonseca, 2013).

4. Estado del arte

Se han venido realizando diferentes estudios e investigaciones acerca de los procesos de conversión termoquímica de biomásas residuales agroindustriales para la generación de energías alternativas que suplan la utilización de combustibles fósiles y que aporten al cuidado del medio ambiente. Se citan a continuación una serie de investigaciones relacionadas con los parámetros más relevantes de los procesos de conversión termoquímica de biomasa.

Salazar et al. (Salazar-Carreño et al., 2015) desarrollaron una investigación a escala de laboratorio, con el fin de evaluar algunas de las características de la ceniza (tamaño de partícula, porcentaje de sílice amorfa, área superficial y gravedad específica) obtenida del proceso de combustión de la cascarilla de arroz de Colombia. De las pruebas desarrolladas, les permitió a los investigadores identificar la temperatura (Entre 600°C y 700°C) como la variable con más influencia en rendimiento del proceso y en la obtención de un material de calidad. En la **Tabla 2**, se presentan los valores porcentuales de la cantidad de material obtenido en el tamizaje, logrando un mayor contenido de material de 97,93% a una temperatura de 650°C. Algunos de los aspectos tenidos en cuenta, como el tiempo de combustión y el tiempo de molienda de la ceniza, no representaron ninguna influencia en el proceso; sin embargo, se detectó que la velocidad de enfriamiento si afecta los porcentajes de sílice amorfa. En cuanto a la resistencia a la compresión, se encontró que, esta varía con el tiempo de curado (28 días) y el porcentaje de sustitución (20% obtenido a 650°C); siendo los valores mostrados, los que produjeron mejores resultados. De las pruebas experimentales realizadas a las muestras de concreto, se identificaron valores de mayor compresión a los 7 y 28 días, en los especímenes preparados con ceniza de cascarilla de arroz, comparados con cilindros 100% de concreto (estándar). En la **Tabla 3**, se exponen los dichos valores.

Tabla 2:

Análisis Gravimétrico de la Ceniza de Cascarilla de Arroz (Cca)

Temperatura de tratamiento (°C)	Porcentaje de material en el fondo del sistema de tamizado (%)
600	96,55
650	97,93
700	93,16
750	89,24

Nota. Fuente: (Salazar-Carreño et al., 2015)

Tabla 3:

Comparación Muestra Estándar vs Mejor Mezcla de Concreto Experimental

Características	Estándar (100% cemento)	Mejor Muestra (80%:20%)
Compresión (kgf/cm ²) - 7 días	400	520,90
Compresión (kgf/cm ²) - 28 días	543	755,06

80% cemento: 20% CCA

Nota. Fuente: (Salazar-Carreño et al., 2015)

Rout, et al. (Rout et al., 2016), centraron su atención en la búsqueda de potenciales alternativas de energías renovables a partir de la transformación de la biomasa, que suplan la necesidad del consumo de los combustibles fósiles. Dicho esto, los investigadores experimentaron con el proceso de pirólisis en un reactor semicontinuo a una temperatura de 450°C a 600°C con velocidad de calentamiento de 20 °C/min, aplicado a la cáscara de coco con el fin de producir bioaceite y biocarbón. Con los resultados de los experimentos obtuvieron un rendimiento del 49.5% de bioaceite a una temperatura de 575°C y un 32% de biocarbón a una temperatura de 400°C; sin embargo, el rendimiento del biocarbón tuvo una disminución del 6.6% al aumentar la temperatura a 600°C. La densidad obtenida del bioaceite corresponde a 1053.6 kg/m³ a 15°C, valor que está por encima de la densidad del petróleo. Su viscosidad de 1.47 cSt a 40°C está por debajo de la viscosidad del combustible Diesel, lo

que la hace adecuada para evitar complicaciones en el bombeo. El poder calorífico fue de 19.75 MJ/Kg, estando muy por debajo con relación al poder calorífico del Diesel.

En cuanto al Biocarbón, su poder calorífico estuvo alrededor de los 23,68 MJ/kg, lo que lo convierte en potencial alternativa para ser utilizado como combustible sólido. El análisis próximo mostró un contenido de humedad de 2.73%, material volátil de 18.93%, carbono de 71.3% y un porcentaje de ceniza de 7.04%. Con el análisis último se obtuvieron valores de 78.03% de carbón, 4.89% de hidrógeno, 1.6% de nitrógeno, 15.2% de oxígeno y azufre menor al 0.01%.

Saad et al. (Saad et al., 2016), enfocaron su estudio en determinar la influencia que se ejerce en las propiedades físicas y químicas de la ceniza de cascarilla de arroz (CCA), al ser pretratada con ácido clorhídrico (HCl) antes de ser sometida al proceso de combustión; esto con el fin de evitar variaciones de dichas propiedades al ser sometida a las altas temperaturas del proceso de quema. La metodología empleada es experimental con carácter cuantitativo, en la que, la biomasa es sumergida en HCl 0,1 N, se le hace un lavado con agua destilada hasta conseguir un pH neutro y luego se le realiza un secado a 110°C y se realiza el proceso de combustión a temperaturas entre 700°C y 800°C por un tiempo de 1 hora. Por último, en un molino de bolas por 15 minutos a 300 rpm, se muele el carbón generado en el proceso. Los resultados mostraron que a 700°C se obtiene sílice (SiO₂) de excelente calidad con un contenido de 97%, con un tamaño 4,493 μm. Dicho esto, se puede decir que la temperatura ideal para el proceso óptimo de combustión, es de 700 °C. En la **Tabla 4**, se muestran los resultados de la composición química de la CCA luego de ser tratada por 4 horas.

Tabla 4:*Composición Química de CCA, Pretratada por 4 Horas*

Composición Química	Contenido a partir de las temperaturas de combustión (%)	
	700 °C	800 °C
SiO ₂	97,00	80,10
P ₂ O ₃	1,63	2,12
Fe ₂ O ₃	0,25	13,70
CaO	0,46	0,48
Al ₂ O ₃	0,09	-
K ₂ O	0,11	2,07
Na ₂ O	-	-
MgO	-	0,89
MnO	-	0,24
SO ₃	-	-
CL	-	-
ZrO ₃	0,25	0,12

Nota. Fuente: (Saad et al., 2016)

Fardhyanti et al. (Fardhyanti et al., 2018), investigaron la forma de generar bio aceite por medio del proceso de pirólisis rápida de cáscara de coco, con el fin de analizar su estructura química para obtener un material con valor agregado. Este proceso se realizó con una temperatura de 500°C añadiendo 10°C de calor cada minuto y sosteniendo por 1 hora la temperatura de pirólisis. Los resultados de los experimentos generaron un bioaceite con densidad de 0,961 g/cm³, valor muy aproximado a la densidad del agua. La viscosidad obtenida del bio aceite es de 4.359 centipoise (cp), la cual cumple con el rango estándar de 4 a 7 cp. En cuanto a su composición, el compuesto más sobresaliente fue el fenol con un 45.42%, condición adecuada para el uso potencial como combustible. Con los resultados mostrados, los autores recomiendan hacer seguimiento a la humedad de la biomasa a la hora de alimentar el gasificador, esto con el fin de que el bio aceite producido no contengan alto contenido de agua. También sugieren, controlar la presencia de oxígeno en el gasificador para optimizar el proceso. En la **Tabla 5**, se expone la composición del bioaceite generado.

Tabla 5:

Compuestos del Bioaceite Obtenido por Pirólisis Rápida de Cáscara de Coco

ITEM	COMPUESTO	PORCENTAJE (%)
1	Furfural	3,77%
2	Fenol	45,42%
3	3-metil-1,2-ciclopentanodiona	4,05%
4	2-metoxifenol	13,37%
5	2-metoxi-4-metil-fenol	3,23%
6	4-etil-2-metoxifenol	2,19%
7	3-metoxi-1,2-bencenodiol	10,09%
8	2,6-dimetoxifenol	11,72%
9	4-metoxi-3-metoximetil-fenol	3,83%
10	5-tert-Butylpyrogallol	2,31%

Nota. Fuente: (Fardhyanti et al., 2018)

Marenco (Marenco, 2019), investigó la posibilidad de implementar un método que le permitiera conseguir un aumento de hidrógeno al hacer rendir los alquitranes obtenidos del proceso de gasificación de biomasa; esto con el fin de evaluar el comportamiento de este elemento químico en el poder calorífico del gas producido. El autor consideró en primera instancia, los estudios de otros investigadores que analizaran las tecnologías de conversión termoquímica y/o procesos químicos que quebrantan las moléculas de los alquitranes para aumentar la generación de hidrógeno. Al realizar los modelos de pruebas en el gasificador de flujo descendente (Downdraft), obtuvo un 37% de hidrógeno y un aumento del 46% del poder calorífico inferior (PCI) para un valor aproximado de 6 MJ/Nm³, con una relación de equivalencia promedio de 0,29. En la

Tabla 6 se exponen las pruebas realizadas y los valores de PCI obtenidos con las distintas condiciones experimentales.

Tabla 6:*Condiciones Experimentales de las Pruebas*

Variable	Unidades	Prueba1	Prueba2	Prueba3	Promedio
Humedad	%	8,8%	10,0%	9,0%	9,3%
Flujo másico Biomasa	kg/h	21,4	22,7	25,8	23,30
Flujo másico Aire	kg/h	23,3	23,7	25,4	24,13
Flujo másico Biochar	kg/h	2,3	2,2	2,8	2,43
Biomasa convertida en Biochar	%	10,6%	9,6%	10,9%	10,37%
Temperatura promedio	°C	1009,8	979,4	832,3	940,5
Relación de Equivalencia	mol/mol	0,30	0,29	0,27	0,29
Poder Calorífico Inferior (PCI)	MJ/Nm ³	4,06	4,24	3,96	4,09

Nota. Fuente: (Marenco, 2019)

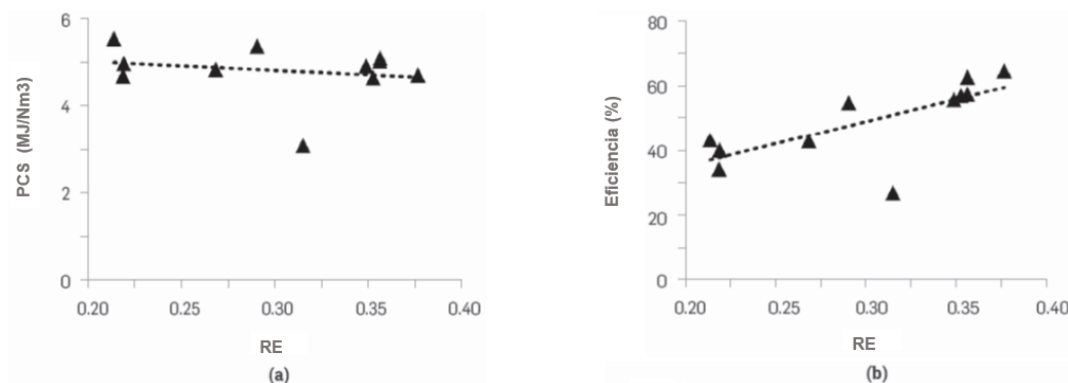
Ram y Mondal (Ram & Mondal, 2019), estudiaron las características de la cáscara de coco verde (CCV) como materia prima para gasificar en un reactor de lecho fluidizado burbujeante comparándola con las características de la cáscara de coco tratada (CCT). El análisis próximo del CCV mostró un contenido de humedad de 4.27%, material volátil de 69.14%, carbono fijo de 21.18% y porcentaje de ceniza de 5.41%. Del análisis último, los investigadores obtuvieron un porcentaje de 45.2% de carbón, 5.6% de hidrógeno, 48.4% de oxígeno, 0.8% de nitrógeno y 12.31 MJ/Nm³ de poder calorífico. De la composición del gas de síntesis obtenida de la CCV se lograron porcentajes en volumen de 27.05% de hidrógeno (H₂), 31.74% de monóxido de carbono (CO), 34.43% de metano (CH₄) y 6.78% de dióxido de carbono (CO₂). En cuanto a la CCT, se obtuvo un aumento del 55% de H₂ con respecto a la CCV y una disminución de CH₄ hasta 8.58%. El poder calorífico también disminuyó de manera drástica, obteniendo un valor de 5.25 MJ/Nm³ para la CCT; lo que muestra que a medida que aumenta el porcentaje de H₂, disminuye el poder calorífico del gas de síntesis.

Verdeza et al. (Verdeza-Villalobos et al., 2019), analizaron el comportamiento del poder calorífico superior (PCS), de la temperatura (TP), la relación de equivalencia (RE) y la eficiencia del proceso de gasificación (EP) en corriente descendente; luego de variar: el

tiempo de oscilación de la tolva, el flujo de aire y la remoción de la ceniza. Según los valores obtenidos, el mejor rendimiento se logró con una RE igual a 0.35, obteniendo un PCS de 5.04 MJ/Nm³ y una EP del 58%. En la **Figura 2**, se expone el comportamiento del PCS y la EP con relación a la RE, donde se puede notar que el PCS tiene una tendencia a disminuir a medida que aumenta la RE; mientras que la EP, aumenta hasta un 60% aproximadamente al aumentar la RE. El rango de RE obtenidas para las pruebas experimentales, estuvo entre 0.22 y 0.38 para una oscilación del PCS entre 3,10 y 5,54 KJ/Nm³. Los autores concluyeron, que tanto el tiempo de oscilación de la tolva como el flujo de aire, ejercen un efecto relevante sobre el rendimiento del proceso.

Figura 2:

Parámetros de Rendimientos en Función de RE



Nota. Fuente: (Verdeza-Villalobos et al., 2019)

Los autores Sarkar y Wang (Sarkar & Wang, 2020), realizaron una serie de pruebas de laboratorio para evaluar el comportamiento de la temperatura del proceso de pirólisis en el rendimiento de producción de biocarbón a partir de la cáscara de coco. La biomasa fue expuesta al aire ambiente para retirar la humedad y luego fue molida y tamizada a 250 µm antes iniciar el proceso de pirólisis en el digestor. La temperatura del proceso utilizada fue de 400°C a 800°C incrementada a una velocidad promedio de 10 °C/min. Los resultados mostraron una baja del 33,6 % al 28,6 % en la obtención de biocarbón en el rango de temperatura entre 400°C y 600°C. También mostraron el rendimiento más alto de bio aceite

de 48.7% con una temperatura de 600 °C. Para el poder calorífico superior del biocarbón, los investigadores encontraron una oscilación entre los 28.1 MJ/Kg y los 30.6 MJ/Kg con un rango de temperatura entre los 400°C y los 800°C, respectivamente; lo que significa un mejor contenido de carbono a altas temperaturas. En la **Tabla 7** se exponen los análisis último y próximo de los desechos de cáscara de coco.

Tabla 7:

Análisis Último y Próximo de los Desechos de Cáscara de Coco

Análisis Último (%)		Análisis Próximo (%)	
Carbono	39,22±0,71	Contenido de Humedad	7,82±0,02
Hidrógeno	4,46±0,08	Material Volátil	79,91±0,05
Nitrógeno	0,22±0,02	Carbono Fijo	12,04±0,04
Oxígeno	56,10±0,81	Ceniza	0,23±0,003
Azufre	ND		
PCS (MJ/kg)	9,62±0,50		

PCS: Poder Calorífico Superior; ND: No detectado

Nota. Fuente: (Sarkar & Wang, 2020)

Vieira et al. (Vieira et al., 2020), analizaron la incidencia en el rendimiento del biocarbón (BCA) a partir de las variables de operación del proceso de pirólisis lenta de la cascarilla de arroz. Para ello, se procesó esta biomasa en un gasificador de lecho fijo y se determinaron tres niveles de estudio (Bajo, medio y alto) para cada una de las cuatro variables evaluadas: masa de la cascarilla de arroz (CA), temperatura del proceso (T), tiempo de residencia (TR) y velocidad de calentamiento (VC). En la **Tabla 8** se muestran los valores por nivel, de cada una de las variables evaluadas. Los autores obtuvieron el mejor rendimiento del biocarbón en peso del 37,71 %, el cual se obtuvo con una masa de 500g de CA a una T de 300°C y un TR de 5400 s con una VC de 20 °C/min. Sin embargo, el valor del poder calorífico superior más alto (HHV = 23,41 MJ/kg) se logró bajo las variables de: 125 g de CA con una T de 500 °C, 10 °C/min de VC y un TR de 5400 s. De los resultados también se determinó que la temperatura sería la variable con más influencia en el proceso de obtención de BCA de calidad; es por ello que, el proceso de conversión termoquímica más apropiado para la extracción de este material, es el proceso de pirólisis. En la **Tabla 9** se

exponen los resultados de los procesos de pirólisis con sus respectivos factores y niveles de operación.

Tabla 8:

Factores y Niveles de Procesos

Factores	Nivel		
	Bajo (1)	Medio (2)	Alto (3)
A - Velocidad de Calentamiento - (°C/min)	5	10	20
B - Temperatura - T (°C)	300	400	500
C - Tiempo de Residencia – TR (s)	3600	5400	7200
D - Masa de Biomasa - (g)	125	250	500

Nota. Fuente: (Vieira et al., 2020)

Tabla 9:

Resultados de los Procesos de Pirólisis

Prueba	Factores codificados				Factores numéricos				Valores de respuesta (% en peso)			
	A	B	C	D	VC (C/min)	T (°C)	TR (s)	M (g)	Material Sólido		Bio-aceite	Gas Pirolítico
									Volátil	Biocarbón		
1	1	1	1	1	5	300	3600	125	32,05±3	35,86 ±1,19	28,70 ±4,5	3,39 ±0,26
2	1	2	2	2	5	400	5400	250	8,66±0,13	33,73 ±1,14	32,14 ±0,06	25,47 ±0,8
3	1	3	3	3	5	500	7200	500	3,73 ±0,8	35,14 ±0,56	36,82 ±0,5	24,31 ±1,03
4	2	1	3	2	10	300	7200	250	36,07±0,15	34,96 ±1,72	15,82 ±5	13,15 ±3,42
5	2	2	1	3	10	400	3600	500	12,8 ±1,9	37,51 ±0,42	39,84 ±1,26	9,81 ±2,8
6	2	3	2	1	10	500	5400	125	6,00 ±0,03	34,74 ±0,27	38,20 ±0,71	21,06 ±1
7	3	1	2	3	20	300	5400	500	33,23±2,98	37,71 ±1,13	6,03 ±2,35	23,03 ±4,18
8	3	2	3	1	20	400	7200	125	8,77 ±0,56	36,16 ±0,05	34,94 ±0,15	20,13 ±0,37
9	3	3	1	2	20	500	3600	250	3,96 ±0,06	34,85 ±0,02	39,80 ±2,4	21,39 ±2,32

Nota. Fuente: (Vieira et al., 2020)

Priya et al. (Priya et al., 2020), mediante el proceso termoquímico de pirólisis en un gasificador de tiro descendente, utilizaron la cáscara de coco como materia prima para la obtención de biocarbón (Biochar) para abono fertilizante en las plantaciones y en la preparación de carbón activado; además, para la generación de hidrógeno como compuesto

químico para mezclar con los gases licuados del petróleo, minimizando el uso de combustibles fósiles. Para las pruebas, se fraccionaron 5 kg de la biomasa en tamaños de 1 a 3 cm para luego ser pirolisados en el gasificador a una temperatura entre 400 y 600 °C en ausencia de oxígeno. Los resultados arrojados en el análisis próximo del bio combustible, suministran los valores porcentuales de la biomasa que resulta en contenido de humedad, material volátil, carbono y cenizas; siendo estos valores: 3.65%, 44.77%, 48.81% y 2.77%, respectivamente. En cuanto al análisis de la composición elemental de la cáscara de coco, se generaron: 73.92% de carbón, 5.6% de hidrógeno, 13.98% de oxígeno, 3.0% de nitrógeno y 3.5% de azufre. Los autores destacan el proceso de pirólisis como el método con más efectividad para la producción de Biochar a partir de la conversión termoquímica de la biomasa.

El estudio desarrollado por Gómez (Gomez et al., 2021), quienes aprovecharon los residuos de distintas industrias agroindustriales de la región (Cascarilla de arroz (CA), tusa de maíz (TM), tallos de sésamo (TS) y desperdicios de algodón (DA)) para evaluar el potencial energético resultante de mezclar proporciones de cada material, en un gasificador de tiro descendente (Downdraft); además de analizar el poder calorífico inferior (PCI) del gas producido, la eficiencia del gas frío (EGF), la temperatura del proceso (TP) y la relación de equivalencia (ER) de las proporciones mezcladas. Las pruebas fueron realizadas con mezclas de biomazas no pretratadas en un gasificador downdraft con aforo de 30 kg/h, registrando las temperaturas de gasificación y determinando la caracterización del gas en un cromatógrafo, junto con los análisis estequiométricos. Con los resultados encontrados, se pudo notar un aumento en la ER (>0.5) al añadir CA; mientras que, en las mezclas que no contenían CA, la ER se mantuvo entre los valores de 0.3 y 0.5. En cuanto a la EGF y el PCI, se obtuvieron valores hasta 57,91% y 4460 KJ/kg; respectivamente. También se observó, que tanto los valores de la EGF como del PCI, se obtuvieron valores altos en ausencia de CA, cuando la proporción de DA se mantuvo en niveles altos. Por último, se tiene que la producción de H₂ presentó mejores resultados con el 15% de adición de CA; mientras que, los mejores resultados en la generación de CO y CO₂, se dieron con el porcentaje más alto de CA (30%).

Hoque et al. (Hoque et al., 2021), trabajaron con el aserrín (AS), la cáscara de coco (CC) y la cascarilla de arroz (CA), con el fin de analizar el comportamiento de las propiedades y las expectativas de producir gas de síntesis por medio del proceso de gasificación. Para la realización de las pruebas, se usaron temperaturas entre los 650°C y los 900°C, con una alimentación de 5 kg/h por 1.38 h de proceso para la CA, 4 kg/h por 1.25 h de proceso para el AS y 3.84 kg/h por 1.3 h de proceso para la cáscara de CC. La tasa de flujo de aire estuvo entre 2 y 3 m³/h. Los resultados analizados mostraron una composición de gas de síntesis de la CA con 18.48% de monóxido de carbono (CO), 10.45% de dióxido de carbono (CO₂), 0.16% de metano (CH₄) y 14% de hidrógeno (H₂). Para el aserrín, el gas de síntesis estuvo compuesto con 20.22% de CO, 8,25% de CO₂, 0,92% de CH₄ y 16,64 % de H₂. A partir de la cáscara de coco, la composición del gas de síntesis producido fue del: 23.02% de CO, 7.05% de CO₂, 1.13% de CH₄ y 18.85% de H₂; notando un aumento en la concentración de H₂ con respecto a los resultados generados en la gasificación de las otras 2 biomásas. Los valores obtenidos para el poder calorífico estuvieron entre los 933.6 kcal/Nm³ y 1278.18 kcal/Nm³ para la cascarilla de arroz y la cáscara de coco, respectivamente; mientras que el aserrín, obtuvo un poder calorífico inferior de 1118.9 kcal/Nm³.

En la investigación realizada por Castro et al. (B. Castro et al., 2021), los autores aprovecharon la ventaja que deja un país agrícola como Colombia, para utilizar biomásas combinadas de coco y maíz en atmósfera de dióxido de carbono (CO₂), con el fin de generar biocombustibles a través de procesos de conversión termoquímica como la pirolisis. El proceso de pirolisis se llevó a cabo por 2 horas en un gasificador de lecho fijo con flujo de CO₂ y a temperatura de 450°C. Los resultados expuestos del poder calorífico de los residuos por separado, revelan que el de la caña del maíz es 15,75% mayor que el de la cáscara del coco, al igual que el obtenido de la mezcla de las biomásas que se encuentra 7,65% por encima que el poder calorífico de la cascara de coco; tal como se muestra en la

Tabla 10. También se observa un poder calorífico para los residuos carbonosos de la pirolisis de 26,062 KJ/Kg, logrando un aumento del 41,92% con respecto al poder calorífico de la cáscara del coco. En cuanto a la caracterización de las biomásas, en la **Tabla 11** se observan los resultados de los análisis próximo y último en porcentaje de masa.

Tabla 10:

Poder Calorífico de las Muestras de Biomasa

PODER CALORÍFICO BIOMASAS (KJ/Kg)	
Caña de Maíz	17,965
Cáscara de Coco	15,135
Mezcla Residuos (50 - 50)	16,39
Residuo Carbonoso	26,062

Nota. Fuente: (B. Castro et al., 2021)

Tabla 11:

Análisis Próximo y Último de Caña de Maíz y Cáscara de Coco

	Análisis Próximo (%)				Análisis Último (%)				
	CF	MV	Cz	Hd	C	H	O	N	S
Caña de Maíz	2,57	89,9	6,8	0,73	49,9	5,58	40	0,8	0,1
Cáscara de Coco	29,2	61,5	3,59	5,73	49,5	7,57	38,1	1,17	0,08

CF: Carbono Fijo; MV: Material Volátil; Cz: Cenizas; Hd: Humedad

C: Carbono; H: Hidrógeno; O: Oxígeno; N: Nitrogeno; S: Azufre

Nota. Fuente: (B. Castro et al., 2021)

El estudio de Viltres y Alarcón (Viltres & Alarcón, 2022), hace énfasis en mejorar el poder calorífico del bio-aceite producido mediante la pirolisis rápida de la mezcla de dos biomásas, con el fin de explorar diferentes métodos que puedan ser implementados en investigaciones futuras para mejorar su calidad y facilitar su utilización de forma directa en los motores de combustión interna. Al realizar la caracterización de las biomásas, los investigadores encontraron un poder calorífico de 17,35 MJ/Kg para la paja de caña de azúcar y 16,8 MJ/Kg para el Capín de Elefante. En la **Tabla 12** muestran un mejoramiento del poder calorífico del bio-aceite al obtener un valor de 20,20 MJ/Kg, conseguido con una velocidad de alimentación de 200 kg/h, temperatura del equipo entre 500 y 550 °C, aire como agente fluidizante con un flujo másico de 86,5 kg/h, tiempo de residencia de 2s, tamaño de la partícula de 2 mm y con

un tiempo total del proceso de 9h. En cuanto al análisis de las propiedades físico químicas del bio-aceite obtenido, se pueden observar características positivas como el aumento en la composición del carbono, del hidrogeno y del nitrógeno; con respecto a otros bio-aceites.

Tabla 12:

Propiedades Físico Químicas del Bioaceite

Propiedades	Unidades	Bio-aceite obtenido	Otros Bio-aceites
Composición Elemental			
C	% (m)	61,10±0,5	48,00-63,50
H	% (m)	7,64±0,02	5,20-7,20
N	% (m)	1,22±0,01	0,07-0,39
S	% (m)	<0,15	0,00-0,05
O (por diferencia)	% (m)	30,04±0,17	32,00-46,00
Color		Negro	Marrón
Humedad	% (m)	10,80	10,20-35,00
Densidad 20 °C	Kg/m ³	1 400	1 208-1 238
Viscosidad cinemática 20 °C	cSt	~ 2 000	50-672
Lignina pirolítica	% (m)	86	15-30
Contenido de sólidos insolubles en metanol	% (m)	7,2	0,17-1,14
pH	Unidades	2,9	2,0-3,8
Poder calorífico superior	MJ/Kg	20,20	15-24,3

Nota. Fuente: (Viltres & Alarcón, 2022)

P. Kumar et al. (P. Kumar et al., 2022), analizaron el efecto de la humedad de la biomasa en el rendimiento de un gasificador de tiro descendente con la compuerta superior abierta para la generación de gas de síntesis y de combustibles para aplicaciones térmicas y eléctricas. Los resultados arrojaron el poder calorífico inferior (LHV) más alto con un valor de 3,709 MJ/Nm³ para el gas de síntesis producido, con un valor óptimo de relación de equivalencia (ER) de 0,309 para el rendimiento del equipo, obtenido con un porcentaje de humedad (PH) de 8,5%. Con este porcentaje de humedad, los resultados arrojaron los valores más alto de contenido de hidrogeno (H₂) de 10,8% y de monóxido de carbono (CO) de 13,3%; mientras que para el metano (CH₄), se obtuvieron los valores más bajos con un porcentaje de 0,9%; tal como se muestra en la **Figura 3**. En la **Tabla 13** se muestran los resultados de 3 pruebas

realizadas con distintos porcentajes de humedad para analizar los parámetros de rendimiento operativo del equipo reactor.

Tabla 13:

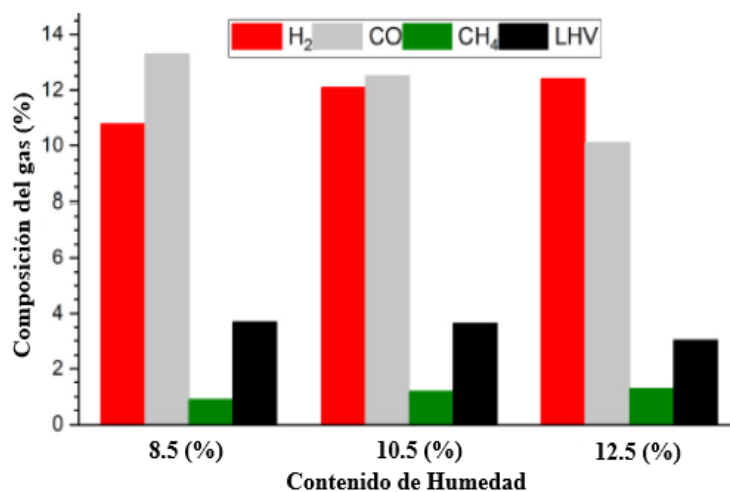
Parámetro de Rendimiento del Gasificador de Tiro Descendente Abierto

Entradas	Unidades	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Densidad del Gas producido	(Kg/m ³)	0.977	0.99	0.985
Energía liberada por Kg de combustible	(MJ/Kg)	14.38	14.62	14.98
Coefficiente de conversión térmica		0.718	0.729	0.743
Relación Aire – Combustible		3.822	2.98	2.96
Poder Calorífico del Gas producido	(KJ/Nm ³)	3.02	3.659	3.709
Masa de Gas generado por Kg de eucaliptus	(kg/kmol)	24.47	24.98	24.64
Peso molecular del Gas producido	(kg/kmol)	24.47	24.98	24.64
Relación de equivalencia		0.399	0.374	0.309

Nota. Fuente: (P. Kumar et al., 2022)

Figura 3:

Efecto del PH de Biomasa en la Composición del Gas Productor y LHV



Nota. Fuente: (P. Kumar et al., 2022)

Todas estas investigaciones fueron revisadas y estudiadas, con el fin de analizar el comportamiento de los gasificadores de tiro descendente y las ventajas de utilizar el proceso de gasificación para generar combustibles alternativos a partir de mezclas de biomasa residual abundantes a nivel global; explorar el comportamiento de parámetros como: presiones de flujo, temperaturas de proceso, relación equivalente, poder calorífico, eficiencia del gas y propiedades de los distintos combustibles producidos.

El presente trabajo busca caracterizar los rendimientos de generación de gas de síntesis, Biochar y bioaceite de la conversión termoquímica de cascarilla de arroz, cascara de coco y fibra de coco; en un micro gasificador de biomasa.

5. Metodología

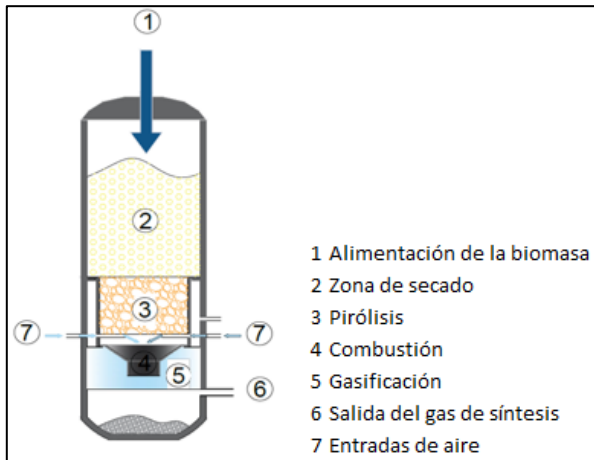


5.1. Inspección y adecuación del reactor

En la **Figura 4** se muestra el reactor utilizado, el cual es del tipo de lecho fijo con corriente paralela (Downdraft). En este equipo, la alimentación de la biomasa se hace por la parte superior de forma continua o por porciones, y del agente oxidante por encima del área donde se presenta la oxidación. Tanto el gas de síntesis como el biochar, son extraídos por la parte inferior. Este tipo de reactores tienen una tecnología sencilla y fácil de maniobrar, necesita del apoyo de agentes oxidantes como el aire, el oxígeno, el vapor de agua; entre otros.

Figura 4:

Reactor de Lecho Fijo Downtdraft



Se realizó una inspección general del equipo y se examinan las condiciones en las que se encuentra el gasificador; luego se analizó el escenario para así acondicionarlo a la necesidad del proyecto. De las fallencias encontradas se mencionan: la falta de sello en la tapa superior del micro gasificador, malla de separación del biocarbón deteriorada, la altura del cono insuficiente para el tiempo requerido de proceso, tornillería en mal estado, falta de entradas para la inyección de aire, falta de termocuplas necesarias para la toma de temperaturas a lo largo del proceso.

En la **Figura 5**, se muestran algunas de las adecuaciones de las fallas encontradas en la inspección del equipo y la instalación de las partes adicionales para llevar a cabo adecuadamente los procesos y poder tomar la información de manera oportuna y veraz.

Figura 5:

Adecuación del Gasificador



Para solucionar el sellado de la tapa superior, se aplicó silicona de tipo loctite 5699. La malla de separación del biocarbón, se cambió por una malla de una granulometría de 3 milímetros por las propiedades físicas de la materia utilizada. Se realizó un alargamiento de 4 cm al cono para mejorar el tiempo de contacto con el medio gasificante. Para la instalación del flujómetro a la entrada del aire, se acopló una tubería; asimismo, se soldaron al interior, tubos de 10 cm de diámetro que hacen las veces de inyectores de aire, permitiendo así focalizar la combustión de la biomasa justo alrededor de los sensores de temperatura. Con la intención de obtener la mayor información posible, se instalaron 2 sensores de temperatura adicionales.

5.2.Preparación de la biomasa

Para la cascarilla de arroz, se aplica temperatura en un rango entre 90°C y 100°C durante 6 horas aproximadamente, hasta llegar a obtener una humedad del 5%, esto con el fin de facilitar el proceso de combustión. En la **Figura 6**, se muestra una imagen del horno eléctrico utilizado en el proceso de secado de la biomasa.

Figura 6:
Horno Eléctrico.



Para la biomasa residual de coco, se le realizó un proceso de triturado por separado de la fibra y de la cáscara. En la **Figura 7**, una imagen de la trituradora marca Penagos con mallado de 10mm. Posterior a esto, se hizo una mezcla de 47 Kg de cáscara de coco y 4.7 Kg de fibra para una relación del 90% de cascara y un 10% de fibra; esto con la finalidad de lograr un proceso espontaneo. Por último, se procedió al proceso de secado de la mezcla, tal como se realizó con la cascarilla de arroz.

Figura 7:
Mezclado de Cáscara y Fibra de Coco



5.3. Procesos de pirólisis y gasificación

Ambos procesos se inician con un encendido parcial con una cantidad de 1 kg de biomasa fresca mezclada con biocarbón de pruebas anteriores, con el fin de generar una combustión inicial, suministrando aire con ayuda de un compresor para oxigenar la mezcla y posteriormente se procede a agregar aproximadamente 6 Kg de biomasa para procesar. Al terminar la alimentación de la biomasa, se toma la medida de referencia del nivel de llenado en el micro gasificador; esto con el fin de determinar la cantidad de cascarilla de arroz que fue gasificada, realizando una comparación con la medida del nivel posterior a los procesos, tal como se muestra en la **Figura 8**. Por último, se procede a sellar el equipo y ajustar las válvulas de entra y salida del aire para alcanzar y estabilizar la temperatura de operación deseada para cada proceso.

Figura 8:

Encendido Parcial del Micro Gasificador



Para la recolección de datos, se hacen tomas periódicas con un lapso de 10 minutos, de temperatura ambiente, temperatura interna del equipo, temperatura a la salida del micro gasificador y flujos de aire. Adicionalmente, la composición de los gases obtenidos en los procesos se determina mediante cromatografía. También se recolecta el bioaceite y el biocarbón producidos al completar los tiempos de proceso. En la **Figura 9**, se muestran el cromatógrafo. De igual manera, en la **Figura 10**, se registran las imágenes del biocarbón y

el bioaceite obtenidos de uno de los procesos ejecutados con cascarilla de arroz. En la **Figura 11** se expone el biocarbón obtenido del proceso de pirólisis de la mezcla residual de coco.

Figura 9:

Cromatógrafo Sigma



Figura 10:

Biocarbón y Bioaceite



Figura 11:

Biocarbón Producto del Proceso de Pirólisis



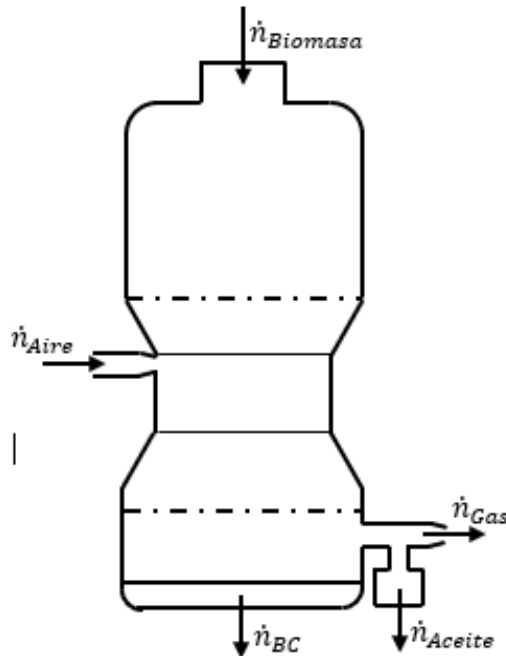
5.4. Balance de masa de la conversión termoquímica

Para las pruebas se utilizó cascarilla de arroz, cáscara de coco y fibra de coco en un gasificador tipo Down draft de laboratorio, con lo cual se analizaron los parámetros de eficiencia y rendimiento de los procesos de conversión termoquímica realizados. La

Figura 12 muestra el esquema de balance de masa.

Figura 12:

Esquema de balance de masa



Para el análisis de los parámetros mencionados se empleó la reacción global de gasificación que se expone en la ecuación (Ec.1). La composición volumétrica de los gases no condensables: monóxido de carbono (vCO), dióxido de carbono (vCO_2), metano (vCH_4), hidrógeno (vH_2) y nitrógeno (vN_2). El flujo de gas instantáneo (\dot{n}_{Gas}) y el carbono sin reaccionar (\dot{n}_{BC}) se midieron para cada mezcla de los procesos.

$$\begin{aligned} & \dot{n}_{Biomasa} + \dot{n}_{aire}(0.21O_2 + 0.79N_2) + \dot{n}_w H_2O \\ & = \dot{n}_{gas}(vCO + vCO_2 + vCH_4 + vH_2 + vN_2) + \dot{n}_m H_2O + \dot{n}_{Aceite} C_6H_{6.2}O_{0.2} \\ & + \dot{n}_{BC} C_{res} \end{aligned} \quad (Ec. 1)$$

Donde (\dot{n}_{BC}) es el flujo molar de la biomasa definido por la composición elemental de la biomasa y su consumo por el gasificador, \dot{n}_{Aire} es el flujo molar de aire usado como agente oxidante, \dot{n}_{Gas} es el flujo molar flujo del gas producido y calculado por la ecuación (Ec.2), \dot{n}_w es la cantidad de agua relacionada con la humedad de la biomasa, \dot{n}_m y \dot{n}_{Aceite} son las cantidades de vapor y alquitrán presentes en el gas producido, y \dot{n}_{BC} es la cantidad de biocarbón producido y medido como residuo en la parte inferior del gasificador. La representación del balance de masa molecular del alquitrán se da mediante la fórmula $C_6H_{6.2}O_{0.2}$ empleada por (Gomez et al., 2021). El alquitrán y el agua son asumidos para ser removidos por el depurador húmedo. La relación entre la masa de aire y el gas se muestra en la ecuación (Ec.3) calculada utilizando un balance de nitrógeno, asumiendo que el aire es la única fuente de N_2 y cualquier contenido de biomasa desde el análisis elemental puede ser ignorado.

$$\frac{\dot{n}_{gas}}{\dot{n}_{aire}} = \frac{1 - 0.21}{vN_2} \quad (Ec. 2)$$

Las ecuaciones (Ec.3), (Ec.4) y (Ec.5); provienen del balance de especies de biomasa donde C, H y O son las fracciones molares normalizadas definidas por análisis elemental.

$$\dot{n}_{BiomasaC} = \dot{n}_{gas}(vCO + vCO_2 + vCH_4) + 6\dot{n}_{Aceite} + \dot{n}_{BC}C_{res} \quad (Ec. 3)$$

$$\dot{n}_{BiomasaO} + 0.2\dot{n}_{aire} + 0.5w = \dot{n}_{gas}(0.5vCO + vCO_2) + 0.5\dot{n}_m + \dot{n}_{Aceite} \quad (Ec. 4)$$

$$\dot{n}_{BiomasaH} + 2w = \dot{n}_{gas}(4vCH_4 + 2vH_2) + 6.2\dot{n}_{Aceite} + 2\dot{n}_w \quad (Ec. 5)$$

w: Agua asociada a la humedad de la biomasa

El poder calorífico inferior (PCI) del gas (MJ/Nm³) es calculado por medio de la ecuación (Ec.6), donde el coeficiente de cada fracción corresponde a su poder calorífico.

$$PCI_{gas} = 12.636vCO + 10.798vH_2 + 3.5818vCH_4 \quad (Ec. 6)$$

La relación equivalente (ER) muestra la relación cuantitativa entre biomasa-aire y la relación de biomasa estequiométrica (estequio) teórica (Gordillo et al., 2009) calculada por las ecuaciones (Ec.8) y (Ec.9).

$$ER = \frac{(\dot{n}_{aire}/\dot{n}_{Biomasa})_{Real}}{(\dot{n}_{aire}/\dot{n}_{Biomasa})_{estequio}} \quad (Ec. 8)$$

$$\left(\frac{\dot{n}_{aire}}{\dot{n}_{Biomasa}}\right)_{estequio} = \frac{1}{0.21}(1.866C + 5.55H - 0.70) \quad (Ec. 9)$$

La eficiencia de la gasificación en frío (EGF), está definida por la relación energética entre el flujo de gas y la energía proporcionada por la biomasa:

$$EGF = \frac{\dot{n}_{gas}PCI_{gas}}{\dot{n}_{Biomasa}PCI_{Biomasa}} \quad (Ec. 10)$$

6. Resultados

La **Adicionalmente** se muestran las temperaturas a las cuales se logró obtener las mejores condiciones del gas de síntesis en cada proceso.

Tabla 14 muestra la composición de los gases promedio para los cuatro tratamientos realizados. Se observa que la mayor concentración de H₂ y CO se dio en el proceso de gasificación de los residuos de coco; lo cual está relacionado al mayor rendimiento del proceso de gasificación expuesto en la **Tabla 16** y asociado, a la densidad de la materia prima y al contenido de carbono fijo. Adicionalmente se muestran las temperaturas a las cuales se logró obtener las mejores condiciones del gas de síntesis en cada proceso.

Tabla 14:

Composición Elemental del Gas de Síntesis Obtenido en Cada Proceso

COMPOSICIÓN DE GASES	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO				MP
	GCA	GRC	PCA	PRC	
H ₂ (%)	4,18	8,51	2,58	3,57	14,7
O ₂ (%)	0,36	1,16	2,52	1,1	2,9
N ₂ (%)	65,39	62,59	65,14	59,33	55,9
CH ₄ (%)	1,6	2,61	1,91	2,07	0,6
CO (%)	7,51	11,7	8,56	6,74	21,5
CO ₂ (%)	20,93	13,4	19,29	27,19	4,3
TEMP (°C)	837,9	837,4	648,7	680,7	

Nota: **GCA:** Gasificación cascarilla de arroz; **GRC:** Gasificación residuos de coco; **PCA:** Pirólisis cascarilla de arroz; **PRC:** Pirólisis residuos de coco; **MP:** Muestra patrón

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se tienen los valores del poder calorífico inferior (PCI) de cada tratamiento, notando el valor más alto en la gasificación de residuos de coco, siendo el 57.9% del PCI de la muestra patrón. Los valores de los PCI obtenidos de los otros tres tratamientos no tuvieron una diferencia significativa entre ellos. En la **Figura 13** se muestra de forma clara la diferencia entre los PCI obtenidos en los distintos tratamientos y el PCI de la muestra patrón.

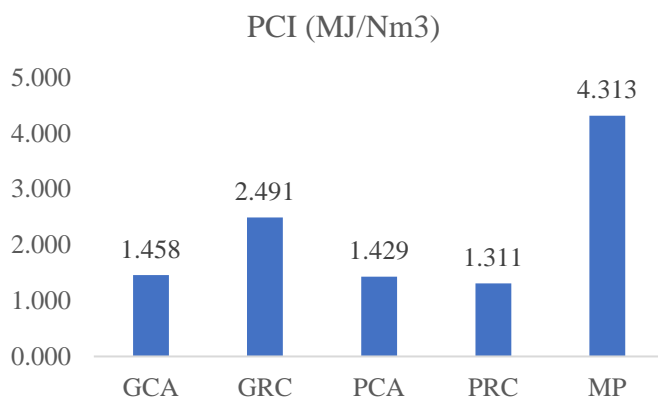
Tabla 15:

Poder Calorífico Inferior (PCI) de Cada Proceso

	CO (%)	H2 (%)	CH4 (%)	PCI (MJ/Nm3)
GCA	7,51	4,18	1,6	1,458
GRC	11,7	8,51	2,61	2,491
PCA	8,56	2,58	1,91	1,429
PRC	6,74	3,57	2,07	1,311
MP	21,4	14,7	0,6	4,313

Figura 13:

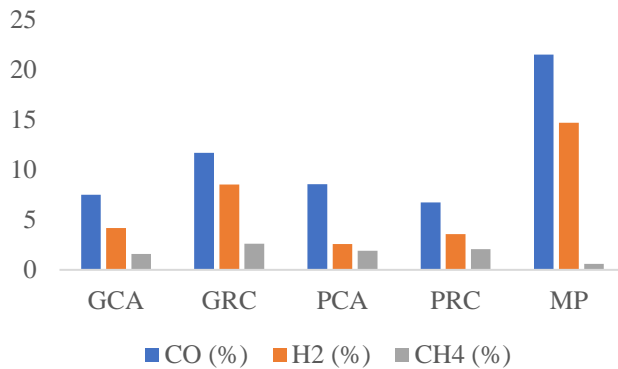
Poder Calorífico Inferior de Cada Proceso



La diferencia promedio de la composición de gas pobre de cada proceso y de la muestra patrón se revelan en la **Figura 14**. Se pudo notar que la generación de H₂ aumentó en los procesos de gasificación y su mayor contenido se logró con la biomasa de coco. El proceso de gasificación de los residuos de coco generó mayor proporción de CO, H₂ y CH₄ en el syngas producido que la cascarilla de arroz. A pesar de que la producción de metano fue mayor al obtenido en la muestra patrón, se evidencia la disminución de las emisiones de estos gases con el uso de los procesos de conversión termoquímica de biomásas.

Figura 14:

Porcentaje de CO, H₂ y CH₄ por Proceso



Del balance de masa, se muestran en la **Tabla 16** el resultado de los flujos másicos de cada uno de los componentes involucrados en el proceso. Estos flujos másicos fueron hallados por medio del modelo ejecutado en el solucionador de ecuaciones de ingeniería (EES). Igualmente se muestra un 84,23% de eficiencia de gasificación para el proceso de gasificación de los residuos de coco, debido al alto porcentaje de flujo másico del gas y su poder calorífico.

Los rendimientos del biochar también se presentan en la **Tabla 16**, siendo el proceso de pirólisis el tratamiento que mostró mejores resultados tanto para la cascarilla de arroz como para los residuos de coco; este último, el que generó el mayor rendimiento con un 18,4% del peso de la biomasa transformada. Adicionalmente, se expone la relación estequiométrica de los componentes H₂/CO, los cuales se encuentran dentro del rango en el que el CO no reacciona con el H₂ y no formar proporciones de CH₄; esto se debe a que las temperaturas favorables para que se genere CH₄ por medio de la reacción entre CO y H₂ deben ser menores a los 580°C (Martín, 2010).

Tabla 16:*Resultados del Balance de Masa (%)*

	GCA	GRC	PCA	PRC
Flujo de biomasa	1,01	0,99	1	1
Flujo de aire	1,27	4,56	0,97	0,8
Flujo de gas	1,55	5,14	1,19	1,11
Flujo de biochar	0,2	0,2	0,23	0,22
Flujo de bioaceite	0,53	0,21	0,55	0,47
Eficiencia de gasificación	13,86	84,23	10,43	9,56
Rendimiento de biochar	8,9	10,9	14,6	18,4
Relación H ₂ /CO	0,56	0,73	0,30	0,53

7. Conclusiones

Para ajustar los parámetros operativos del equipo, se desarrollaron modificaciones en el sistema de inyección de agente gasificante con el fin de tener un control sobre la proporción que se debía adicionar al proceso. Se ajustó el sistema de medición de flujo con el fin de focalizar la combustión de la biomasa alrededor de los sensores e incrementar la estabilidad térmica del equipo y la toma de mediciones de masa en tiempo real. Adicionalmente, se alargó el cono 4 cm con el fin de mejorar el tiempo de contacto con el agente gasificante.

Por medio de las mediciones experimentales y balances estequiométricos se establecieron los rendimientos del gas, el bioaceite y el biochar producidos en el micro gasificador. Los rangos promedios del rendimiento obtenidos para el gas se encuentran entre el 58% y el 76%, del bioaceite entre el 4% y el 6%. El rendimiento de biochar para el residuo de coco se encuentra entre el 10% y el 19%, mientras que para la cascarilla de arroz estuvo entre el 8% y el 15%.

En la eficiencia de gasificación en frío se obtuvo el porcentaje más alto en la gasificación de residuos de coco con un 84,23%; sin embargo, en el proceso de pirólisis de esta biomasa se obtuvo la menor eficiencia con un 9.56%. Para la cascarilla de arroz, la eficiencia se mantuvo entre el 10,43% y el 13,86% para los procesos de pirólisis y gasificación, respectivamente. Los rendimientos de biochar para los residuos de coco estuvieron alrededor de 166g de char / 900g de biomasa para el proceso de pirólisis; mientras que para la gasificación estuvo alrededor de 98g de char / 900g de biomasa. En cuanto a la cascarilla de arroz, los rendimientos de biochar para el proceso de pirólisis estuvo alrededor de 131g de char / 900g de biomasa; mientras que, para el proceso de gasificación, estuvo alrededor de 80g de char / 900g de biomasa.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Abnisa, F., Arami, A., Wan, W., Sahu, J y Noor, I. (2013). Utilization of oil palm tree residues to produce bio-oil and bio-char via pyrolysis. *Energy Conversion and Management*, 76(2013). 1073-1082. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.08.038>.
- Ahumada, L., Verdeza, A., Bula, A. y Lombana, J. (2016) Optimización de las condiciones de operación de la microgasificación de biomasa para producción de gas de síntesis. *Información Tecnológica*, 27 (3). 179-188. DOI: <https://www.researchgate.net/publication/303854220>.
- Álvarez, O. y Cortés, F. (2011). Zonificación del potencial energético de la biomasa residual forestal en la cuenca del lago Ranco, Chile. Antecedentes para la planificación energética regional. *Bosque*, 32 (1). 77-84. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002011000100009>.
- Atencia, N. y Pianeta, J. (2021). *Sistema de recuperación de bio aceite producto de la gasificación y/o pirolisis de la cascarilla de arroz por condensación libre de agua*. (Tesis de grado). Montería: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Barco, J. (2015). *Gasificación de cuesco de palma para la obtención de gas combustible en un reactor de lecho fijo*. (Tesis de Magister). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. DOI: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59019>.
- Bharani, A., Raveena, G. y Dineshkumar, M. (2020). Bio char and syngas production from coconut shell by pyrolysis: An experimental study. *AIP Conference Proceedings* 2225(2020). DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0005571>.
- Bhattacharyya, S. (2006). Energy access problem of the poor in India: Is rural electrification a remedy? *Energy Policy*, 34 (2006). 3387 – 97. DOI: 10.1016/j.enpol.2005.08.026.
- Cai, J., He, Y., Yu, X., Banks, S., Yang, Y., Zhang, X., Yu, Y., Liu, R. y Bridgwater, A. (2017). Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass. *Renewable and sustainable energy reviews*, 76 (2017). 309-322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.072>.

- Castro, B., Rodríguez, J., Hernández, W., Camargo, G. y Agudelo, N. (2021). Evaluación del proceso de pirólisis con residuos de maíz y coco en atmósfera de CO₂. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 12 (2). 33-46. DOI: <https://hdl.handle.net/10901/19435>.
- Castro, D. (2018). *Evaluación del proceso de pirólisis aplicado al material lignocelulósico residual proveniente del pino patula en atmosfera de dióxido de carbono*. (Trabajo de grado). Bogotá: Universidad Libre de Colombia.
- Castro, S. (2015). *Instalación y arranque de un prototipo de gasificación*. (Trabajo de grado). México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ceotto, E., Di Candilo, M. y Librenti, I. (2010). Biomass characteristics and energy contents of dedicated lignocellulosic crops. *Center for Industrial Crops*, 133. DOI: <https://www.researchgate.net/publication/284099731>.
- Chen, J., Fan, X., Jiang, B., Mu, L., Yao, P., Yin, H. y Song, X. (2015). Pyrolysis of oil-plant wastes in a TGA and a fixed-bed reactor: Thermochemical behaviors, kinetics, and products characterization. *Bioresource Technology*, 192(2015). 592-602. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.05.108>
- Díaz, D. (2019). *Usos potenciales de cascarilla de arroz en el Departamento de Casanare*. (Trabajo de grado). Yopal: Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
- Escudero, A. y Aristizábal, J. (2012). Caracterización mecánica de fibras de coco como refuerzo de materiales compuestos poliméricos. Universidad Libre.
- Fardhyanti, D., Kurniawan, C., Sigit, R. y Triwibowo, B. (2018). Producing Bio-Oil from Coconut Shell by Fast Pyrolysis Processing. *MATEC Web of Conferences*, 237(2018). DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823702001>.
- Fedearroz. (2021). <https://fedearroz.com.co/es/fondo-nacional-del-arroz/investigaciones-economicas/estadisticas-arrocera/area-produccion-y-rendimiento/>.
- Fonseca, F. (2013). *Pirólisis de los residuos lignocelulósicos del henequén para la obtención de bioaceite*. (Tesis de maestría). Yucatán, México: Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.
- Fonseca, N. (2003). Estado del arte del uso del gas de gasificación termoquímica de biomasa (GG) en motores de combustión interna alternativos. *Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas*. Bogotá: Universidad de los Andes.

- García, L. (2011). *Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo*. (Tesis de Maestría). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. DOI: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7686>.
- García, S. (2015). *Estudio de factibilidad para la industrialización de la fibra de coco en el Recinto La Tolita, Pampa de Oro – Esmeraldas*. (Tesis de grado). Guayaquil, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- Gao, N., Sliz, M., Quan, C., Bieniek, A. y Magdziarz, A. (2021). Biomass CO₂ gasification with CaO looping for syngas production in a fixed-bed reactor. *Renewable Energy*, 167 (2021). 652–661. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.134>.
- Giraldo, O. (2012). *Conversión de biomasa recalcitrante originada en la producción de etanol a partir de la planta de banano y su fruto en combustibles mediante procesos de pirólisis*. (Tesis de grado). Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Gómez, R., Arenas, E., Zapata, Z., Bula, A. y Camargo, D. (2021). CaCO₃ and air/steam effect on the gasification and biohydrogen performance of corn cob as received: Application in the Colombian Caribbean región. *Biomass and Bioenergy*, 153 (2021). 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106207>.
- Gómez, R., Palacio, M., Arango, J., Ávila, A. y Mendoza, J. (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 (2021). 522-529. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.10.014>.
- Hoque, E., Rashid, F. y Aziz, M. (2021). Gasification and Power Generation Characteristics of Rice Husk, Sawdust, and Coconut Shell Using a Fixed-Bed Downdraft Gasifier. *Sustainability* 13(2021). DOI: <https://doi.org/10.3390/su13042027>.
- International - U.S. Energy Information Administration (EIA). (2015). https://www.eia.gov/international/data/world#/?tl_type=p&tl_id=5-A&pa=0000001&ct=0&ord=SA&c=rurvfvvtvnnvvlurvfvfvvvvfvvvou20evvvvvvvvnnvvuvo&f=A.
- Jenkins, B., Baxter, L., Miles, T. y Miles, T. (1998). Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*, 54(1 - 3), 17 - 46. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(97\)00059-3](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(97)00059-3).

- Kumar, A., Kumar, N., Baredar, P. & Shukla, S. 2015. A review on biomass energy resources, potential, conversion and policy in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45. 530-539. DOI: 10.1016/j.rser.2015.02.007.
- Kumar, P., Subbarao, P., Kala, L. y Vijay, V. (2022). Real-time performance assessment of open-top downdraft biomass gasifier system. *Cleaner Engineering and Technology*, 7 (2022). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100448>.
- Laib, I. (2017). *Uso de la cáscara de coco para la reducción de la demanda energética de leña, en el sector residencial del departamento de Suchitepéquez*. (Trabajo de grado). Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Marengo, C. (2019). *Metodología para cuantificar el potencial de enriquecimiento de gas con hidrógeno mediante el análisis de rendimiento de conversión termoquímica de alquitranes durante la gasificación biomasa en reactores tipo downdraft*. (Trabajo de grado). Montería: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Márquez, I. (2012). *Gasificación por lecho fijo de la fibra obtenida en el proceso de extracción del aceite de palma africana*.
- Martin, L. (2010). *La reacción de metanación*. (Trabajo de grado). Zaragoza, España: Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial.
- Minagricultura, (2019). *Cadena de coco*. Dirección de Cadenas Agrícolas y Forestales. <https://sioc.minagricultura.gov.co/Coco/Documentos/2019-12-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf>.
- Obokparó, I. (2020). Properties of ternary cementitious concrete matrix containing rice husk ash and coconut husk ash. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 9(02).
- Osorio, L. (2019). *Análisis técnico económico para el uso de la cascarilla de arroz en la generación de energía eléctrica a partir del proceso de gasificación. Caso de estudio: molino de arroz Pacande de la ciudad de Villavicencio – Meta*. (Trabajo de maestría). Bogotá: Universidad Libre de Colombia.
- Patiño, P. (2014). *Biomasa: estudio de factibilidad para implementar un sistema de generación de energía a partir de residuos vegetales*. (Tesis de grado). Bucaramanga: Universidad de Santander.

- Perlack, R., Wright, L., Turhollow, A. y Graham, R. (2005). Biomass as Feedstock for a Bioenergy and Bioproducts Industry: The Technical Feasibility of a Billion -Ton Annual Supply. *Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge*. DOI: DOE/GO-102005-2135 ORNL/TM-2005/66.
- Ram, M. y Mondal, M. (2019). Investigation on fuel gas production from pulp and paper waste water impregnated coconut husk in fluidized bed gasifier via humidified air and CO₂ gasification. *Energy* 178(2019). 522 – 529. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.165>.
- Reed, T. y Das, A. (1988). Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems. Golden, Estados Unidos. *Solar Energy Research Institute*. DOI: <https://doi.org/10.2172/5206099>.
- Roselló, J., Soriano, L., Santamarina, M., Akasaki, J., Monzó, J. y Payá, J. (2017). Rice straw ash: A potential pozzolanic supplementary material for cementing systems. *Industrial Crops and Products* 103(2017). 39-50. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.03.030>.
- Rout, T., Pradhan, D., Singh, R. y Kumari, N. (2016). Exhaustive study of products obtained from coconut shell pyrolysis. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 4(2016). 3696-3705. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2016.02.024>.
- Saad, S., Nuruddin, M., Shafiq, N. y Ali, M. (2016). The effect of incineration temperature to the chemical and physical properties of ultrafine treated Rice Husk Ash (UFTRHA) as supplementary cementing material. *Procedia Engineering*, 148(2016). 163-167. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.515>.
- Salazar, D., García, R. y Ortiz, O. (2015). Laboratory processing of Colombian rice husk for obtaining amorphous silica as concrete supplementary cementing material, *Construction and Building Materials*, 96 (2015), pp. 65–75. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.178>.
- Sarkar, J. y Wang, Q. (2020). Different Pyrolysis Process Conditions of South Asian Waste Coconut Shell and Characterization of Gas, Bio-Char, and Bio-Oil. *Energies* 13(2020). 1-14. DOI: 10.3390/en13081970.

- Susastriawan, A., Saptoadi, H. y Purnomo. (2017). Small scale downdraft gasifiers for biomass gasification: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76 (2017). 989-1003. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.112>.
- Titiloye, J., Bakar, M. y Odetoeye, T. (2013). Thermochemical characterisation of agricultural wastes West Africa. *Industrial Crops and Products* 47(2013). 199-203. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.03.011>.
- Toj, O. (2008). *Caracterización física, mecánica y química de fibras de desecho del fruto del coco, para utilización de matrices fibro-reforzadas*. (Trabajo de grado). Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Valverde, A., Sarria, B. y Monteagudo, J. (2007). Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz. *Scientia et Technica Año XIII*, 37.
- Verdeza, A., Lenis, Y., Bula, A., Mendoza, J. y Gómez, R. (2019). Performance analysis of a commercial fixed bed downdraft gasifier using palm kernel shells. *CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro*, 9(2), 79 - 88. DOI: <https://doi.org/10.29047/01225383.181>.
- Vieira, F., Romero, C., Arce, G. y Ávila, I. (2020). Optimization of slow pyrolysis process parameters using a fixed bed reactor for biochar yield from rice husk, *Biomass and Bioenergy*, 132 (2020), pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105412>.
- Viltres, R. y Alarcón, A. (2022). Caracterización química del bio-aceite de pirólisis rápida de biomasa. Chemical characterization of bio-oil of the fast pyrolysis from biomass. *Rev. Cubana de Química*, 34(1). 131 – 158.
- Wang, S., Dai, G., Yang, H. y Luo, Z. (2017). Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 62 (2017). 33–86. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.peccs.2017.05.004>.
- Wiyono, A., Pratiwi, TPSI, Priadi, CR, Surjosatyo, A., Dafiqurrohman, H. (2017). Investigación de las características de cogasificación de las mezclas de pellets de fibra de madera y coco y cáscara de arroz en una corriente fija Gasificador de lecho. *Revista Internacional de Tecnología*, 8(7). 1207-1216.