



NUEVAS REALIDADES PARA LA EDUCACIÓN EN INGENIERÍA:
CURRÍCULO, TECNOLOGÍA, MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

13 - 16
DE SEPTIEMBRE

2022

CARTAGENA DE INDIAS,
COLOMBIA



Encontro Internacional de
Educação em Engenharia ACOFI

Diseño de un gasificador de lecho fijo en equicorriente de núcleo abierto para operar con cascarilla de arroz

Óscar Mauricio Carmona Agudelo, Sebastián Díaz Ortiz, José Reinaldo Garzón Mercado, Andrés David Morales Rojas, Yuhan Arley Lenis

**Institución Universitaria Pascual Bravo
Medellín, Colombia**

Resumen

Los problemas medioambientales asociados al uso de combustibles fósiles y la eventual escasez de estos han motivado el desarrollo de tecnologías de aprovechamiento de fuentes renovables de energía. Entre estas, sobresale la biomasa, por su disponibilidad, producción con poca dependencia de las condiciones ambientales y facilidad de conversión. Por otro lado, en Colombia se producen cerca de 520.000 toneladas de cascarilla de arroz anualmente, ubicando este residuo como uno de los de mayor potencial energético. Entre los métodos de aprovechamiento, se destaca la gasificación por generar un gas que puede ser empleado en máquinas térmicas convencionales luego de pocas modificaciones.

En Colombia existen muy pocas experiencias documentadas en las que se utilice la gasificación como mecanismo de valoración energética de la biomasa y dada la gran aplicabilidad de esta tecnología, en este proyecto se presenta el diseño y los avances en la construcción de un prototipo de gasificación de lecho fijo equicorriente de núcleo abierto para operar con cascarilla de arroz. Se selecciona como potencia de diseño 20 kW_{th}, debido a que, de usar el gas para generación eléctrica, podría ser empleado en grupos electrógenos de baja potencia, inferior a 5kWe, los cuales son de uso común en zonas con bajo nivel de acceso a la electricidad. El diseño del reactor parte de mediciones experimentales exploratorias realizadas en un gasificador equicorriente invertido, en donde se determinó que la tasa específica de gasificación (SGR) varía entre 120 y 200 kg/h/m² mientras se produce un gas con poder calorífico inferior (PCI) entre 3.5 y 4 MJ/Nm³, valores que dependen del flujo de gasificante empleado y del estado termoquímico del proceso. Haciendo uso de relaciones termodinámicas y de métodos Heurísticos, se determinan las dimensio-

nes principales del reactor, así como sistemas y subsistemas requeridos para su operación en continuo. De los resultados se destaca que, para la potencia de diseño definida, se requiere de un lecho cilíndrico de sección transversal de diámetro 0.35 m y longitud de 1 m. Las temperaturas alcanzadas en las pruebas exploratorias se mantuvieron por debajo de 900 °C lo que permite emplear acero inoxidable AISI 304 como material de la zona de reacción. Actualmente la construcción del reactor presenta un grado de avance cercano a 90% y se han iniciado pruebas de verificación de flujo de biomasa en frío.

Palabras clave: gasificación de biomasa; cascarilla de arroz; diseño de reactor

Abstract

The environmental problems associated with the use of fossil fuels and their eventual scarcity have motivated the development of technologies to employ renewable energy sources. Among these, biomass stands out due to its availability, production with little dependence on environmental conditions, and ease of conversion. On the other hand, about 520,000 tons of rice husks in Colombia are produced annually, placing this residue as one of those with the most significant energy potential. Among the methods of use, gasification stands out for generating a gas that can be used in conventional thermal machines after a few modifications.

In Colombia, there are very few documented experiences in which gasification is used as a mechanism for a biomass energy assessment. Given the great applicability of this technology, this project presents the design and progress in constructing a downstream fixed bed biomass gasification prototype with an open core to operate with rice husk. 20 kWth is selected as design power because it could be used in low power generator sets, less than 5kWe, which are commonly used in areas with a little level of access to electricity. The reactor's design is based on experimental measurements carried out in an inverted downstream gasifier for exploratory purposes. The specific gasification rate (SGR) reached varies between 120 and 200 kg/h/m², giving a gas with a lower calorific value (LHV) between 3.5 and 4 MJ/Nm³. That values depend on the gasifier flow used and the thermochemical state of the process. Using thermodynamic relations and heuristic methods, the main dimensions of the reactor are determined, as well as the systems and subsystems required for its continuous operation. The results highlight that a cylindrical bed with a cross-section of 0.35 m diameter and 1 m length is necessary for the defined design power. The temperatures reached in the exploratory tests were below 900 °C, which allows the use of AISI 304 stainless steel as the reaction zone material. Currently, the reactor construction is nearly 90% complete and cold biomass flow verification tests have begun.

Keywords: biomass gasification; rice husk; reactor design

1. Introducción

La gasificación es un proceso termoquímico mediante el cual se produce un gas combustible de baja densidad energética empleado principalmente para generación de electricidad en motores



de combustión interna acoplados a generadores [1–3]. Este proceso se divide en las etapas de secado, desvolatilización, oxidación y reducción, mediante las cuales se llega a un gas compuesto por CO , CO_2 , CH_4 , H_2 , N_2 , trazas de hidrocarburos e impurezas. Cuando se utiliza aire como agente gasificante, la concentración de inertes, principalmente nitrógeno, suele alcanzar valores cercanos al 60%, lo que conduce a un gas con PCI entre $4\text{--}6 \text{ MJ}/\text{Nm}^3$, lo cual es considerablemente bajo comparado con el gas natural ($PCI_{GN} \approx 39 \text{ MJ}/\text{Nm}^3$). Esta característica ha llevado a que el gas sea denominado “gas pobre”.

Actualmente se dispone de diferentes configuraciones de gasificadores, los cuales se dividen en tres grandes grupos: lecho fijo, lecho fluidizado y lecho arrastrado; en [4–6] se presentan sus principales características. Debido a la baja generación de partículas y alquitranes, la tecnología más empleada para el aprovechamiento del gas en motores de combustión interna en potencias inferiores a 2 MWe, es la de lecho fijo equicorriente. Las características de esta configuración así como los valores típicos de temperaturas y reacciones se presentan en [7]

En el presente proyecto se busca el diseño de un reactor para el aprovechamiento energético de cascarilla con una potencia nominal de 20 kWth, este rango de potencia delimita la tecnología a emplear a sistemas de lecho fijo. Aunque se tienen referencias de sistemas de gasificación fluidizados operando con cascarilla [8,9], en donde se puede hacer uso de catalizadores para la reducción de los alquitranes generados [10], no se consideran estos sistemas, debido a su mayor nivel de complejidad.

Entre los gasificadores de lecho fijo se selecciona la configuración en equicorriente por permitir la generación de un gas con bajo contenido de alquitranes, lo cual facilitaría el uso futuro del gas tanto en quemadores como en motores de combustión interna, aspecto de gran relevancia si se considera su aprovechamiento energético en molinos arroceros compactos. Esta tecnología es seleccionada a pesar del bajo tamaño de partícula y densidad aparente de la cascarilla de arroz, debido a que existen referencias documentadas sobre el diseño y la operación de gasificadores con este tipo de biomasa, tanto a nivel experimental como a nivel comercial [11,12]. Dentro de la subcategoría de los sistemas equicorriente, se selecciona el sistema en el que no se consideran variaciones de área al interior del reactor con el fin de facilitar el flujo de material sólido al interior del lecho. El uso de sistemas de lecho fijo para gasificación de cascarilla se viene referenciando desde hace ya varias décadas, de hecho en 2015, se presentó un informe de sistemas de gasificación comerciales usados en Camboya para la generación de electricidad con base en este residuo, en este se detallan instalaciones con unidades que van hasta los 750 kWe [11]. Estudios como el de Son Ling et al., [13], Ma et al., [14] y Yoon et al [15], también muestran procesos de gasificación exitosos en sistemas de lecho fijo equicorriente.

Recientemente se han presentado varios estudios en los que se detalla el diseño de este tipo de gasificadores para operar con cascarilla, es el caso del gasificador de 14 kWe diseñado por Htet [16], quien detalla el proceso de definición de las dimensiones principales del reactor y su eficiencia, aunque a la fecha no se tenga documentada la operación del sistema. Un diseño similar fue presentado por Susastriawan et al. [17,18] quienes presentan el diseño y al caracterización del reactor operando con cascarilla de arroz, alcanzando eficiencias de hasta 76% con temperaturas cercanas a 900 °C. Estudio que además sirve de fundamento para la selección de la tecnología de



lecho fijo equicorriente como la más adecuada para la transformación en el nivel de potencia del que trata el presente estudio.

Pese a que varios trabajos han documentado el diseño de gasificadores para operar con cascarilla de arroz, no se encuentra en la literatura el detalle del mecanismo empleado para el control de la posición del frente de llama ni la estrategia seguida para lograr el movimiento efectivo de la biomasa al interior del reactor, aspectos que son abordados en el presente trabajo.

2. Metodología

De acuerdo con pruebas experimentales desarrolladas en un gasificador de lecho fijo invertido operando con cascarilla de arroz, se puede establecer para la cascarilla de arroz que, la tasa específica de gasificación (SGR) varía entre 120 y 200 kg/h/m² mientras se produce un gas con PCI entre 3.5 y 4 MJ/Nm³, en un proceso con una eficiencia en frío (CGE) cercana a 60%. Partiendo de dicha información y considerando teoría termodinámica y correlaciones semi-empíricas, se determinan las dimensiones típicas del gasificador presentado de manera simplificada en la Figura 1.

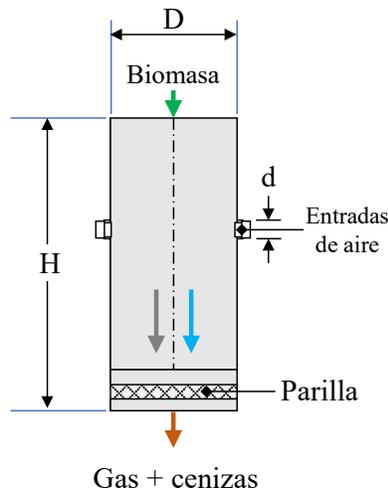


Figura 1. Esquema del sistema de gasificación a diseñar y construir

El diámetro se define a partir de la Ecuación 1, para la cual se considera 13 MJ/kg como el poder calorífico inferior de la biomasa (PCI_{bms}) y 20 kWth como la potencia térmica de diseño (P_{th}).

$$D = \left(\frac{4P_{th}}{\pi * CGE * PCI_{bms} * SGR} \right)^{0.5} \quad \text{Ecuación 1}$$

La altura mínima del lecho se define a partir de la Ecuación 2 donde, para la densidad de la biomasa (ρ_{bms}), se emplea 125 kg/m³. El valor "t" hace referencia al tiempo que podría operar el reactor sin que se realice ninguna alimentación de biomasa. En este caso, se define 1 hora como un valor adecuado, dada la potencia del equipo.

$$H = \frac{SGR * t}{\rho_{bms}}$$
Ecuación 2

El diámetro de las entradas de aire (d), se determina haciendo uso de la Ecuación 3, donde se toma $AFR = 9.5 \text{ m}^3/h$. Esta variable define la cantidad de aire que requeriría el proceso operando en la ciudad de Medellín. Usando tres entradas de aire ($n = 3$) y procurando no superar una velocidad superficial de 8 m/s , se determina el diámetro de dichas entradas.

$$d = \left(\frac{4 * AFR}{\pi * n * vel} \right)^{0.5}$$
Ecuación 3

Luego de definir las dimensiones básicas del reactor, se procede con el modelado CAD del sistema, donde se procura por el diseño de sistemas de bajo nivel de complejidad.

3. Resultados

De acuerdo con la metodología empleada y considerando los resultados obtenidos mediante la caracterización experimental del proceso, las dimensiones principales del gasificador estarían en los siguientes rangos $95 \text{ mm} < D < 348 \text{ mm}$, $237 \text{ mm} < H < 880 \text{ mm}$ y $d = 14 \text{ mm}$. Buscando un diseño de baja complejidad constructiva y el uso de materiales comerciales, las dimensiones seleccionadas son $D = 304 \text{ mm}$, $H = 1000 \text{ mm}$, y tres entradas de aire cada una con un diámetro $d = 25.4 \text{ mm}$. De manera general, en la Figura 2 se presenta el esquema del sistema planteado, este consta de dos unidades: i) el sistema de gasificación de cascarilla, y ii) El sistema de arrastre de los gases. Este último dispone de un soplador para la generación del vacío que permita el arrastre de los gases a través del lecho.

Respecto al reactor de gasificación de cascarilla, el sistema fue diseñado de manera modular buscando que a futuro se pueda probar el efecto de la variación dimensional en componentes del lecho y la parrilla principalmente. Además, se tuvo en consideración que el sistema permitiera fácil acceso a la zona de reducción y a la parrilla, lo anterior con el fin de facilitar las labores de mantenimiento de estos componentes. En la Figura 3, se presenta el diseño general del sistema, en él se pueden diferenciar tres grandes componentes: i) el sistema de soporte, ii) el lecho del reactor y iii) el cenicero.



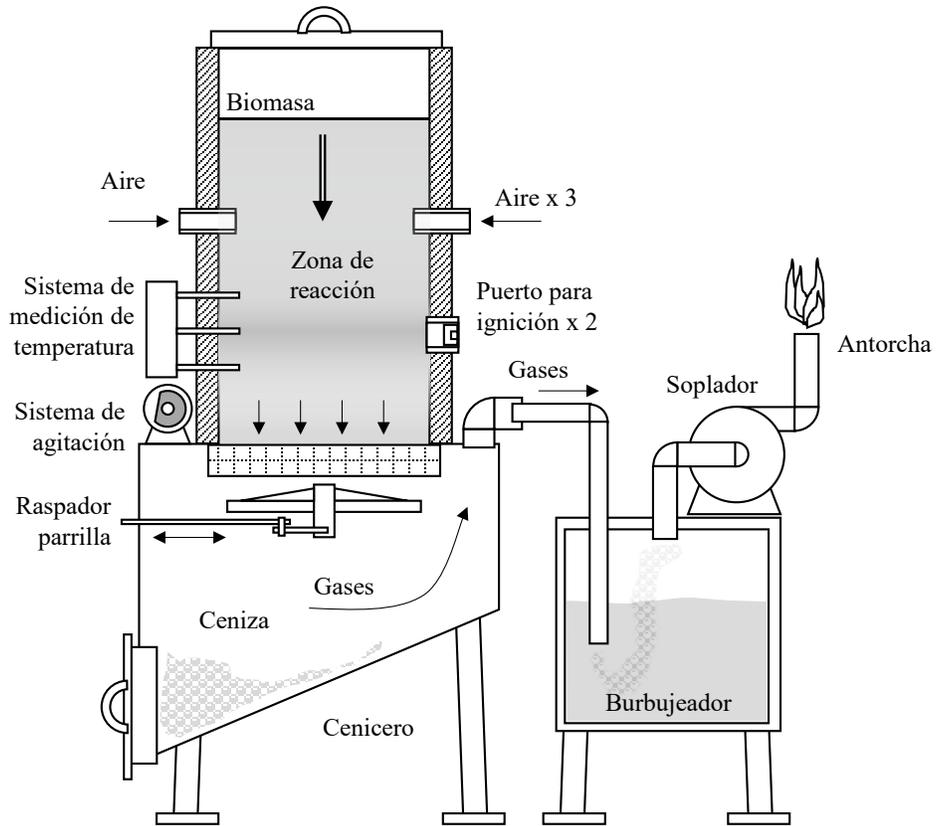


Figura 2. Esquema del sistema de gasificación de cascarilla de 20 kWth

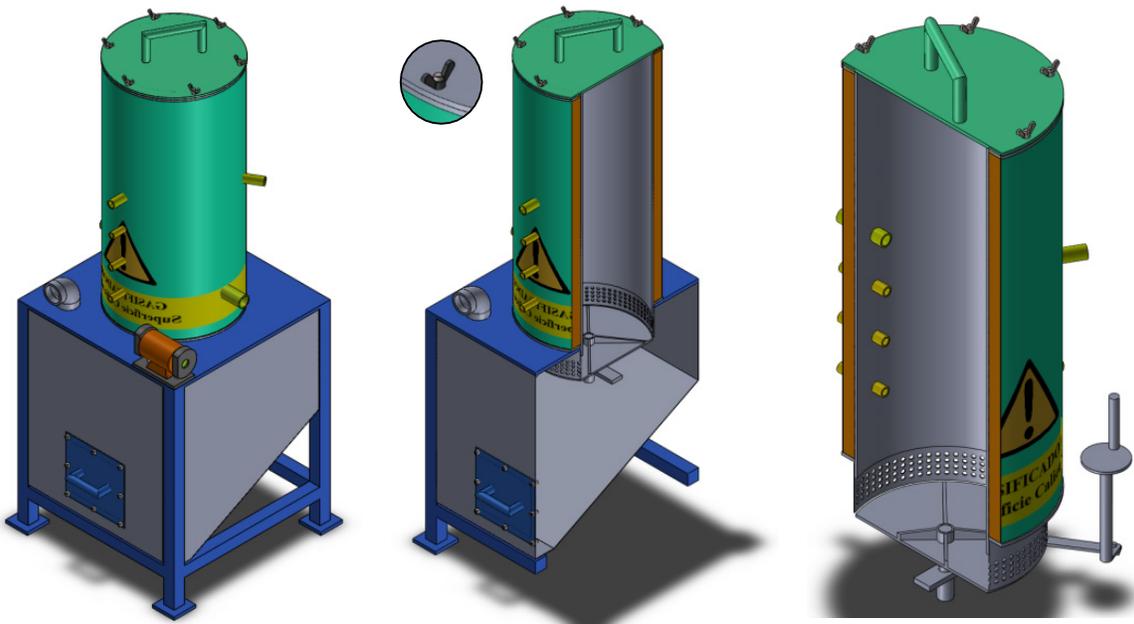


Figura 3. Gasificador de lecho fijo en equicorriente con capacidad de 20 kWth

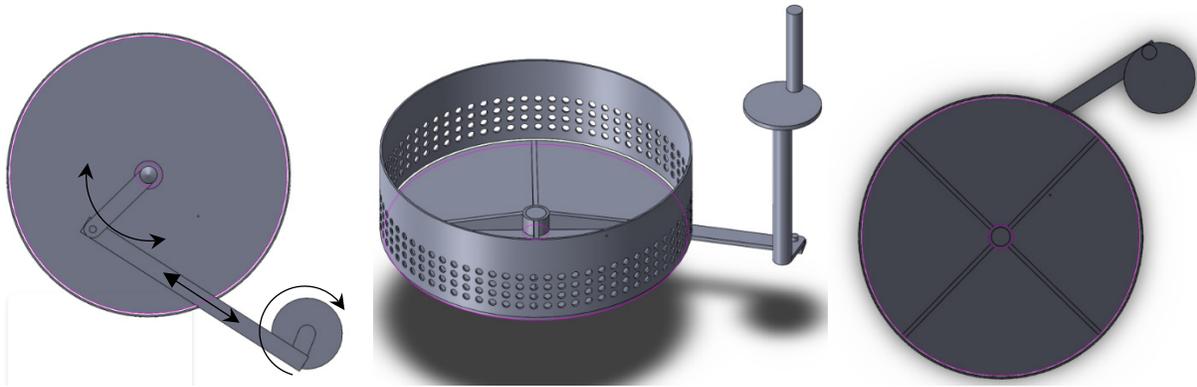


Figura 4. Mecanismo de movimiento de la parrilla

El cenicero, que comprende la parte inferior del gasificador, es proyectado en lámina de acero galvanizado liza, de 2.5 mm de espesor. Su diseño facilitará la remoción de la ceniza producida en el proceso mediante un movimiento de vaivén, como se muestra en la figura 4. El lecho por su parte es proyectado en tubería de 12 in calibre 10 en acero inoxidable AISI 304, y se recubre por fibra mineral y cobertura en lámina de acero inoxidable AISI 304. El sistema dispone de tres perforaciones para medidores de temperatura, tres entradas de aire y dos puertos dispuestos en la parte inferior del reactor para facilitar la ignición de la biomasa. Sobre la parte superior, el sistema de apertura empleará tuercas en mariposa, para facilitar el proceso de carga y descarga de biomasa.

Para facilitar la circulación de la biomasa a través del reactor, se considera sobre el lecho un sistema de vibración que emplea una masa descentrada y un motor de 125W, el cual tiene la posibilidad de regular la velocidad con el fin de acelerar y desacelerar la circulación de la biomasa a través del lecho.

3.1. Proceso de fabricación

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, de izquierda a derecha presenta el proceso de ensamble del gasificador, siendo la última correspondiente al estado actual del equipo. Durante el proceso de fabricación se emplearon equipos como torno de banco, fresadora y soldadura GMAW. Los cuales se consideran convencionales entre las máquinas herramientas. Dichos procesos indican que el reactor puede ser fabricado con procesos de bajo costo y considerando las capacidades de la industria local.



Figura 5. Proceso de ensamble de componentes

Actualmente, se vienen adelantando pruebas del flujo de aire y de biomasa al interior del reactor operado en frío. La intensidad de vibración junto con la regulación de altura y el vaivén del plato de la parrilla, se han mostrado como las principales características del dispositivo para controlar el flujo de biomasa a través del lecho. La ubicación del frente de llama se definirá mediante interpolación de Lagrange On-line, entre los tres valores medidos para la temperatura y considerando la distancia entre puntos de medición. Toda vez que se establezca la posición del frente de llama, se tomara la acción de control sobre la vibración del lecho y sobre el vaivén de la parrilla.

4. Conclusiones

Este trabajo presenta el diseño y fabricación de un gasificador de lecho fijo equicorriente de 20kWth para operar con cascarilla de arroz. Las experiencias recolectadas durante este proceso permiten obtener las siguientes conclusiones.

- Las dimensiones principales del gasificador para cumplir con la potencia de diseño serían: diámetro del reactor de 304 mm y altura del lecho de 1000 mm. Adicionalmente, se requieren tres entradas de aire cada una con un diámetro de 25.4 mm. De acuerdo con el diámetro definido se requieren 3629 mm² por cada kWth que se proyecte en el diseño.
- El control de la posición del frente de llama se puede lograr mediante la definición de su ubicación mediante tres medidores de temperatura y actuando conjuntamente sobre la vibración del lecho y el vaivén del plato de la parrilla.
- De acuerdo con los procesos de fabricación y materiales usados en el proyecto, se identificó que el gasificador se puede desarrollar empleando las capacidades de la industria local sin que sean requeridos procesos de manufactura diferentes a los convencionales.

5. Referencias

- [1] Bridgwater, A. V. V., 1995, "The Technical and Economic Feasibility of Biomass Gasification for Power Generation," *Fuel*, **74**(5), pp. 631–653.
- [2] Perez, J. F., Lenis, Y., Rojas, S., and León, C., 2012, "Decentralized Power Generation through Biomass Gasification: A Technical-Economic Analysis and Implications by Reduction of CO₂ Emissions | Generación Distribuida Mediante Gasificación de Biomasa: Un Análisis Técnico - Económico e Implicaciones Por Reduc," *Rev. Fac. Ing.*, (62).
- [3] Raman, P., Ram, N. K., and Gupta, R., 2013, "A Dual Fired Downdraft Gasifier System to Produce Cleaner Gas for Power Generation: Design, Development and Performance Analysis," *Energy*, **54**, pp. 302–314.
- [4] The International Bank, 1999, *Energy from Biomass a Review of Combustion and Gasification Technologies*, Washington.
- [5] Ruiz, J. A. A., Juárez, M. C. C., Morales, M. P. P., Muñoz, P., and Mendivil, M. A. A., 2013, "Biomass Gasification for Electricity Generation: Review of Current Technology Barriers," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **18**(0), pp. 174–183.
- [6] Harting, J., Frijters, S., Ramaioli, M., Robinson, M., Wolf, D. E., and Luding, S., 2014, "Recent Advances in the Simulation of Particle-Laden Flows," *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, **223**(11), pp. 2253–2267.
- [7] Lenis, Y., 2013, "Estudio Del Proceso de Gasificación de Biomasa En Lecho Fijo Equicorriente," Universidad de Antioquia.
- [8] Bharath, M., Raghavan, V., Prasad, B. V. S. S. S., and Chakravarthy, S. R., 2018, "Co-Gasification of Indian Rice Husk and Indian Coal with High-Ash in Bubbling Fluidized Bed Gasification Reactor," *Appl. Therm. Eng.*, **137**(March), pp. 608–615.
- [9] Makwana, J. P., Pandey, J., and Mishra, G., 2019, "Improving the Properties of Producer Gas Using High Temperature Gasification of Rice Husk in a Pilot Scale Fluidized Bed Gasifier (FBG)," *Renew. Energy*, **130**, pp. 943–951.
- [10] Zhang, G., Liu, H., Wang, J., and Wu, B., 2018, "Catalytic Gasification Characteristics of Rice Husk with Calcined Dolomite," *Energy*, **165**, pp. 1173–1177.
- [11] Nguyen, H. N., and Ha-duong, M., 2015, "Rice Husk Gasification for Electricity Generation in Cambodia in December 2014 Rice Husk Gasification for Electricity Generation in Cambodia in December 2014 Introductory Summary," (December 2014), pp. 0–12.
- [12] Susastriawan, A. A. P., and Saptoadi, H., 2017, "Small-Scale Downdraft Gasifiers for Biomass Gasification: A Review," **76**(March), pp. 989–1003.
- [13] Lin, K. S., Wang, H. P., Lin, C. J., and Juch, C. I., 1998, "A Process Development for Gasification of Rice Husk," *Fuel Process. Technol.*, **55**(3), pp. 185–192.
- [14] Ma, Z., Ye, J., Zhao, C., and Zhang, Q., 2015, "Gasification of Rice Husk in a Downdraft Gasifier: The Effect of Equivalence Ratio on the Gasification Performance, Properties, and Utilization Analysis of Byproducts of Char and Tar," *BioResources*, **10**(2), pp. 2888–2902.
- [15] Yoon, S. J., Son, Y. Il, Kim, Y. K., and Lee, J. G., 2012, "Gasification and Power Generation Characteristics of Rice Husk and Rice Husk Pellet Using a Downdraft Fixed-Bed Gasifier," *Renew. Energy*, **42**, pp. 163–167.
- [16] Htet, M. T., 2018, "Design and Performance for 14kW Downdraft Open Core Gasifier," *Int. J. Sci. Res. Publ.*, **8**(7), pp. 290–294.
- [17] Susastriawan, A. A. P., Saptoadi, H., and Purnomo, 2018, "Design and Experimental Study of Pilot Scale Throat-Less Downdraft Gasifier Fed by Rice Husk and Wood Sawdust," *Int. J. Sustain. Energy*, **37**(9), pp. 873–885.
- [18] Susastriawan, A. A. P., Saptoadi, H., and Purnomo, 2019, "Effect of Tuyen Distance above Grate on Propagation Front and Performance of Downdraft Gasifier with the Feedstock of Rice Husk," *Renew. Energy*, **134**, pp. 1034–1041.



Sobre los Autores

- **Óscar Mauricio Carmona Agudelo**, Laboratorista del departamento de mecánica Automotriz en la I.U. Pascual Bravo, auxiliar investigador, estudiante de ingeniería Mecánica. Correo electrónico: Oscar.carmona567@pascualbravo.edu.co
- **Sebastián Díaz Ortiz**, Laboratorista del departamento de mecánica en soldadura en la I.U. Pascual Bravo, auxiliar investigador, estudiante de Ingeniería Mecánica. Correo electrónico: s.diaz1134@pascualbravo.edu.co
- **José Reinaldo Garzón**, auxiliar investigador e Ingeniero Mecánico. Correo electrónico: jose.garzon044@pascualbravo.edu.co
- **Andrés David Morales Rojas**, profesor del departamento de mecánica en la I.U. Pascual Bravo, Ingeniero Mecánico y Magister en Ingeniería Mecánica Correo electrónico: andres.morales@pascualbravo.edu.co
- **Yuhan Arley Lenis Rodas**, profesor del departamento de mecánica en la I.U. Pascual Bravo, Ingeniero Mecánico, Magister en Ingeniería y Doctor en Ingeniería Mecánica. Correo electrónico: yuhan.lenis@pascualbravo.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2022 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)

