

EVALUACIÓN DE UN GASIFICADOR DE FLUJO DESCENDENTE UTILIZANDO ASTILLAS DE MADERA DE CAFÉ

Carlos Eugenio Oliveros Tascón*; Juan Rodrigo Sanz Uribe*; Nelson Rodríguez Valencia*

OLIVEROST, C.E.; SANZ U., J.R.; RODRÍGUEZ V., N. Evaluación de un gasificador de flujo descendente utilizando astillas de madera de café. Revista Cenicafé 68(2):61-75. 2017

Se evaluó un equipo de fabricación comercial diseñado para generar electricidad mediante la gasificación de biomasa lignocelulósica, Unidad Generadora de Energía Eléctrica (UGEE), con gasificador de flujo descendente de biomasa y gases y potencia máxima de 20 kWe, utilizando astillas de madera del café. Se utilizó un diseño factorial 2x3, con dos tamaños de las astillas recomendados por el fabricante (100% y 85%), de longitud entre 10 y 40 mm, y tres cargas externas conectadas al dispositivo (un motor eléctrico de 5,0 kW y dos de 6,6 kW). En cada tratamiento se tuvieron cinco réplicas. Las variables de respuesta fueron consumo de biomasa, producción de energía y eficiencia térmica. El gas combustible obtenido de la gasificación de la madera del café, con un contenido de humedad de 10% a 15% (base húmeda), presentó 19,0% de CO, 19,9% de H₂, 3,0% de CH₄, 10,0% de CO₂, 0,2% de O₂ y poder calorífico inferior de 5.669,3 kJ.m³. El tamaño de las astillas en la biomasa utilizada y la carga externa aplicada afectó el desempeño de la UGEE. La mayor eficiencia térmica (63,8%) y producción de gas (2,48 m³.kg⁻¹ de biomasa) se obtuvieron utilizando astillas de café del tamaño recomendado por el fabricante y conectando a la UGEE los tres motores eléctricos. Con biomasa con 85% de astillas de madera del café del tamaño requerido se presentaron interrupciones en su flujo a través de la garganta del gasificador, que afectaron la producción de gas combustible y ocasionan la detención del motor de combustión interna del equipo.

Palabras clave: Biomasa residual, eficiencia térmica, madera de café, bioenergía.

EVALUATION OF A DOWNSTREAM GASIFIER USING COFFEE WOOD CHIPS

A commercially manufactured equipment designed to generate electricity by lignocellulosic biomass gasification, Electric Energy Generating Unit (UGEE), with a downward flow biomass and gases gasifier and a maximum power of 20 kWe, using coffee wood chips was evaluated. A 2x3 experimental factorial design with two chip preparations: 100% and 85% of chips with the size recommended by the manufacturer, *i.e.*, a length between 10 and 40 mm and three external loads connected to the device (an electric engine of 5.0 kW and two of 6.6 kW) were used. Each treatment had five repetitions. The response variables were: biomass consumption, energy production and thermal efficiency. The gas obtained from the gasification of the coffee wood, with a moisture content between 10% and 15% (wet basis), had 19.0% of CO, 19.9% of H₂, 3.0% of CH₄, 10.0% of CO₂, 0.2% of O₂ and a low calorific value of 5,669.3 kJ.m³. The size of the chips in the biomass and the external load affect the performance of the UGEE. The highest thermal efficiency (63.8%) and gas production (2.48 m³.kg⁻¹ of biomass) were obtained using coffee wood chips of the size recommended by the manufacturer and connecting the three electric motors to the UGEE. The use of biomass with 85% of coffee wood chips of the required size has flow interruptions down the throat of the gasifier, which affect the production of fuel gas and make the internal combustion engine of the equipment stop.

Keywords: Residual biomass, thermal efficiency, coffee wood, bioenergy.

* Investigador Principal e Investigadores Científicos III, respectivamente. Disciplina de Poscosecha. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Manizales, Caldas, Colombia.

El consumo anual de electricidad *per cápita* en Colombia, entre 2010 y 2014, fue de 1.123 kWh (3), generada principalmente en grandes y pequeñas centrales hidroeléctricas (68,1%), en plantas termoeléctricas (31,4%), turbinas eólicas (0,12%) y 0,38% en plantas de cogeneración en el Valle del Cauca utilizando el bagazo de la caña de azúcar (8). En el 2013 la capacidad instalada para cogeneración era 187 MW, de los cuales 51 MW fueron vendidos a la red nacional de energía (2). Para el 2017 se espera generar 360 MW en las plantas instaladas en el sector azucarero y vender 166 MW a la red nacional (*ibidem*).

En la producción anual de café en Colombia, 14,2 millones de sacos de 60 kg en 2016, se genera la siguiente biomasa: 3 Mt de madera seca durante la renovación de cafetales, 0,37 Mt de pulpa seca, 1,0 Mt de mucílago y 0,16 Mt de cascarilla o cisco seco de café. La madera producida tiene potencial de generar hasta 52,47 PJ.año⁻¹ de energía. Actualmente, la mayoría de la madera se utiliza en las cocinas rurales, con bajo aprovechamiento de su energía (< 10%). La cascarilla se emplea para calentar el aire en secadores mecánicos utilizados en el secado del café empleando tecnologías que aprovechan del 30% al 50% de su potencial energético.

La gasificación de biomasa lignocelulósica es utilizada para la generación de energía térmica, mecánica y eléctrica de una manera eficiente y sostenible, con menor impacto medioambiental que el producido por los combustibles fósiles (13, 28). Su desarrollo y utilización ha sido más evidente en tiempos de altos precios del petróleo y, más recientemente, debido a las preocupaciones ambientales. En Colombia, su uso es muy limitado, principalmente con fines académicos (9), aunque hay abundante

disponibilidad de biomasa adecuada para la gasificación, principalmente de la producción de café (11).

Mediante la gasificación de la madera del café puede producirse energía térmica con mayor eficiencia y menor impacto ambiental que con las tecnologías que se encuentran actualmente en uso en Colombia en el secado del café (22). También puede generarse energía eléctrica en forma sostenible para utilizarla en comunidades rurales que no estén conectadas al sistema nacional interconectado.

La gasificación es un proceso termoquímico en el cual se obtiene gas combustible, denominado gas de síntesis (syngas), a partir de oxidación parcial de la biomasa o carbón mineral a temperaturas entre 800 y 900°C (14). El gas obtenido con bajo poder calorífico (4 a 6 MJ/Nm³), consta principalmente de CO₂, H₂ y CH₄ y fluidos condensables que deben ser retirados en alto porcentaje mediante procesos físicos o químicos para utilizar el syngas en motores de combustión interna (5).

En la gasificación se presentan los procesos de secado, pirólisis, oxidación y reducción. En el proceso de secado, con temperatura de hasta 100°C, se retira agua de la biomasa. En el proceso de pirólisis se presenta la degradación térmica o volatilización de la materia en ausencia de oxígeno, iniciando a temperaturas cercanas a 200°C (27), obteniéndose un material sólido (carbón o biochar) y fluidos condensables que dan origen a combustibles (12). La celulosa y la hemicelulosa son las fuentes principales de volátiles (4). En el proceso de oxidación, en presencia de un agente reactivo (aire en la mayoría de los casos), se producen gases, vapor de agua y carbón (5, 21, 22, 23), bajo las siguientes reacciones químicas (19):

En la zona de oxidación (1.100°C - 1.500°C)



En el proceso de reducción, con temperatura entre 900 y 1.100°C, se obtienen los principales gases combustibles del syngas (CO, H₂ y CH₄), en las reacciones que se indican a continuación (*ibídem*),



Las tecnologías utilizadas para la gasificación de la biomasa pueden clasificarse en dos grandes grupos (4): de lecho fijo y de lecho fluidizado. Dependiendo de la dirección relativa de la biomasa y de los gases generados, los gasificadores de lecho fijo pueden clasificarse como de flujo ascendente, flujo descendente y flujo cruzado. Los más utilizados en la

producción de energía de hasta 1MW son los de flujo ascendente y descendente, con las principales ventajas y desventajas que se indican en la Tabla 1.

Las principales propiedades de la biomasa para la producción de energía son el contenido de humedad, el poder calorífico, la relación carbono fijo/volátiles, el contenido de cenizas y el contenido de álcalis (15).

El desempeño de un gasificador es afectado principalmente por el tipo y condiciones de la biomasa (contenido de humedad, tamaño y densidad), flujo de la biomasa, agente oxidante utilizado y flujo y relación de equivalencia (kg de aire/kg de biomasa suministrado y kg de aire/kg de biomasa estequiométrico) (10, 12, 14, 27).

Para madera de café se reporta el análisis proximal y elemental presentado en la Tabla 2. De acuerdo con esta información, la fórmula química empírica para la madera del café es C₃H₄O₂ y el aire estequiométrico requerido en la combustión es 6,35 kg aire/kg de madera (28).

Tabla 1. Ventajas y desventajas de gasificadores de flujo descendente y ascendente (1, 22).

Tipo	Ventajas	Desventajas
Flujo ascendente	Baja caída de presión Alta eficiencia térmica Baja producción de escoria	Alta producción de alquitranes en el gas combustible
Flujo descendente	Producción de gas con baja concentración de alquitranes	Altura de los equipos No apropiados para partículas de tamaño inferior a 10 mm.

Tabla 2. Análisis proximal y elemental de la madera del café (25).

Humedad (% base seca)	Análisis proximal (%)				Análisis elemental (%)				
	Volátiles	Carbono fijo	Azufre	Cenizas	C	O	H	N	S
11,44	73,63	12,9	0,06	2,03	43	36,3	4,7	0,9	0,07

En la literatura consultada no se encontró información sobre el empleo de la madera del café (astillas) en gasificadores de flujo descendente ni de otro tipo. En esta investigación se evaluó el desempeño de un equipo de gasificación comercial de flujo descendente, utilizando astillas de la madera del café.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización. Esta investigación se realizó en Cenicafé (Manizales), localizado a 5° 00' latitud Norte, 75° 36' longitud Oeste y altitud de 1.310 m. Con temperatura y humedad relativa promedio de 20,7°C y 78%, respectivamente.

Equipos. El equipo utilizado fue una unidad generadora de energía eléctrica (UGEE) con

capacidad máxima de 20 kWe (GEK 20 kWe), presentado en la Figura 1, fabricado por la empresa All Power Labs (APL) de Estados Unidos.

La UGEE consta de los siguientes elementos:

- Un gasificador de flujo descendente de gases y biomasa (Figura 2a).
- Un ciclón para retirar partículas presentes en el gas combustible producido (Figura 2b).
- Un filtro construido con chips de madera de café para retener partículas y retirar gran parte del alquitrán presente en el gas combustible producido (Figura 2c).
- Un dispositivo para retirar continuamente las cenizas producidas en el reactor.



Figura 1. Unidad utilizada para generar energía eléctrica GEK 20 kWe (UGEE) a partir de astillas de madera de café.



Figura 2. Componentes principales del gasificador: **a.** Reactor, **b.** Ciclón, **c.** Filtro, **d.** Sacudidor de la canasta donde se realiza el proceso de reducción, **e.** Motor de combustión interna, **f.** Generador.

- Un dispositivo para sacudir la canasta en la cual se realiza el proceso de reducción, evitando su obstrucción por partículas y cenizas (Figura 2d).
- Un motor de combustión interna con cilindrada de 3,0 L operado con el gas combustible producido en la gasificación (Figura 2e).
- Un generador que entrega a su máxima capacidad 20 kWe (Figura 2f).

Adicionalmente el equipo dispone de termopares tipo K y sensores de presión para monitorear su funcionamiento y obtener el mejor desempeño ajustando principalmente el sacudidor de la canasta en forma manual o automática.

Las astillas de madera requeridas para la operación de gasificador, según el fabricante del equipo, deben presentar longitud entre 10 y 40 mm para evitar obstrucciones en su paso a través de la garganta del gasificador, por la formación de puentes (*bridging*) entre ellas. Para obtenerlas se utilizó una máquina de dos cuchillas marca Koyote CK4 (Figura 3a) y tallos de 80 cm de longitud, de árboles de café Variedad Castillo® de 5 años, renovados por zoqueo. El material cortado con la máquina se clasificó utilizando dos mallas, con aberturas de 25 x 25 mm y 12,5 x 12,5 mm, y con separación manual de astillas de más de 40 mm de longitud. El material seleccionado se secó hasta humedad del 10% al 15% (base húmeda), recomendada por el fabricante, obteniendo

el producto que se presenta en la Figura 3b. La densidad promedio de los chips con las especificaciones mencionadas fue 229,0 kg.m³ (D.E. 8,0 kg.m³).

El costo de la producción de astillas a partir de la madera del café fue de US\$ 0,31. kg⁻¹ considerando la mano de obra empleada y el costo de operación de la máquina (17). La energía utilizada en la obtención de astillas fue equivalente al 1,83% de la energía producida por las astillas, valor similar al reportado por Sjaak y Koppejan (28).

Para la carga de las astillas, operación y limpieza del equipo al final de cada ensayo se siguió el procedimiento recomendado por el fabricante. La potencia eléctrica generada por la UGEE se utilizó para el accionamiento de motores AC: uno con una potencia de 5,0 kW y dos de 6,6 kW conectados a 220V, cada uno acoplado a un ventilador centrífugo.

Para medir la biomasa consumida en los ensayos con la UGEE se utilizó una báscula de piso marca Jaramillo con capacidad máxima de 3.000 kg y resolución de 0,5 kg.

La energía eléctrica requerida por los motores conectados a la UGEE en cada ensayo se midió utilizando un vatímetro trifásico análogo marca Elster con resolución de 0,1 kWh.

La composición (v/v, %) de los principales gases combustibles producidos por la gasificación de la madera del café (CO₂, CO, H₂, CH₄, O₂) y el poder calorífico inferior de la mezcla gaseosa se midió utilizando un analizador de gases marca Gasboard 3100 P.

Diseño experimental. La UGEE se evaluó utilizando un diseño factorial 2x3, dos porcentajes de tamaño de chips en la masa utilizada y tres cargas externas aplicadas, como se presenta en las Tablas 3 y 4. En cada tratamiento se tuvieron cinco repeticiones y el tiempo mínimo de operación del equipo para cada uno fue de 1 hora.

En cada ensayo se midieron las siguientes variables:

- Peso de biomasa, m_b (kg), cada 15 min (Δt)
- Tiempo (t) definido para cada medición



Figura 3. Obtención de astillas de la madera del café. a. Equipo utilizado, b. Astillas con las dimensiones recomendadas por el fabricante UGEE.

Tabla 3. Factores y niveles para la evaluación de la UGEE GEK 20 kW

Porcentaje de astillas en la masa utilizada del tamaño recomendado por el fabricante (10 a 40 mm)	100% y 85% (mínimo porcentaje para evitar fallas en el equipo, observado en ensayos preliminares)
Carga externa aplicada	5,0 kW – 11,6 kW y 18,2 kW

Tabla 4. Tratamientos utilizados en la evaluación de la UGEE GEK 20 kW.

Tratamiento	Astillas del tamaño recomendado por el fabricante (%)	Carga externa aplicada (kW)
T1	100	5,0
T2	100	11,6
T3	100	18,2
T4	85	5,0
T5	85	11,6
T6	85	18,2

- Velocidad del aire en la entrada al gasificador (m.s⁻¹)
- Eficiencia de conversión de biomasa en combustible (η_g),% (Ecuación <2>)

$$\eta_g = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_b} \cdot 100 \quad <2>$$

Donde:

\dot{m}_g : Flujo másico de gas producido (kg.h⁻¹)

\dot{m}_b : Flujo de biomasa (kg.h⁻¹)

- Temperatura ambiente y en las zonas de combustión y reducción del gasificador (°C)
- Presión en las zonas de combustión, reducción y en el filtro del gasificador (Pa)
- Energía consumida (E) en los motores AC (kWh)
- Caída de presión en el medidor de orificio (mm H₂O)

A partir de la información anterior se obtuvieron las siguientes variables de respuesta:

- Consumo específico de biomasa (C_e), kg.kWh⁻¹, usando la Ecuación<1>:

$$C_e = \frac{m_b}{E} \quad <1>$$

En cada ensayo, \dot{m}_g se obtuvo a partir del caudal y la densidad de los gases producidos. Para obtener el caudal se midió la caída de presión en un medidor de orificio con relación área de orificio/área de ducto de 0,5 y constante 0,64 (20). La densidad promedio del gas producido se obtuvo considerando la composición estimada en ensayos preliminares (CO, CO₂, H₂, CH₄ y O₂) y temperatura promedio de 50°C (0,783 kg.m³).

- Eficiencia térmica (η_T), %, (Ecuación <3>)

$$\eta_T = \frac{Q.LHV_g}{\dot{m}_b.LHV_b} \cdot 100 \quad <3>$$

Donde:

Q : Flujo de gas combustible ($m^3 \cdot h^{-1}$)

LHV_g : Poder calorífico inferior del gas producido ($kJ \cdot m^{-3}$)

\dot{m}_b : Flujo de biomasa ($kg \cdot h^{-1}$)

LHV_b : Poder calorífico inferior de la biomasa ($kJ \cdot kg^{-1}$). Para madera de café con contenido de humedad de 11,4% (base húmeda), reportan $17.493,3 \text{ kJ} \cdot kg^{-1}$ (25).

- Producción específica de gas combustible (syngas) (G_p), $m^3 \cdot kg^{-1}$ de biomasa (Ecuación <4>)

$$G_p = \frac{Q}{\dot{m}_b} \quad <4>$$

Adicionalmente, se tuvieron las siguientes variables complementarias:

- Consumo de biomasa (C_b), $kg \cdot h^{-1}$, (Ecuación <5>)

$$C_b = \frac{w_b(t + \Delta t) - w_b(t)}{\Delta t} \quad <5>$$

- Relación de equivalencia (RE), utilizando la Ecuación <6>:

$$RE = \frac{\left(\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_b}\right)_{Experimental}}{\left(\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_b}\right)_{Estequiométrico}} \quad <6>$$

- Flujo de aire ($kg \cdot h^{-1}$)/flujo de biomasa ($kg \cdot h^{-1}$)
- Flujo de gas producido ($kg \cdot h^{-1}$)

Para cada tratamiento se obtuvo el promedio y el error de estimación. Se aplicó el análisis

de varianza de una vía, al arreglo factorial 2×3 , al 5%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Composición del gas producido y poder calorífico inferior

En la Figura 5 se presenta la composición del syngas durante el ensayo. Se observó mayor variación en CO que en H_2 . La Tabla 5 presenta la composición media del gas producido (v/v, %). Los valores obtenidos fueron similares a los reportados para gasificadores de flujo descendente utilizando diferente material lignocelulósico (5, 6, 7, 26).

En la Tabla 6 se presentan los resultados obtenidos en los tratamientos considerados en la investigación, con cinco repeticiones por tratamiento.

La mayor producción de gas combustible (syngas), con mayor poder calorífico y menor concentración de alquitranes, por el craqueo térmico (21, 28), se obtiene cuando las temperaturas en las zonas de oxidación y reducción alcanzan valores entre $800 - 900^\circ C$ y $600 - 750^\circ C$, respectivamente, lo cual ocurre después de una hora de operación del equipo (Figura 6). A partir de este momento es posible encender el motor de combustión interna e iniciar la generación de energía eléctrica.

Flujo de aire. A medida que aumenta el número de motores eléctricos conectados a la UGEE debe aumentar la producción de gas combustible para atender la nueva demanda de energía. El flujo de aire que ingresó a la zona de combustión del gasificador alcanzó valores entre $9,29$ y $17,67 \text{ kg} \cdot h^{-1}$, manteniendo la relación de equivalencia en valores entre $0,21$ y $0,27$, que se observan en proceso de gasificación de la biomasa lignocelulósica (4, 12, 21).

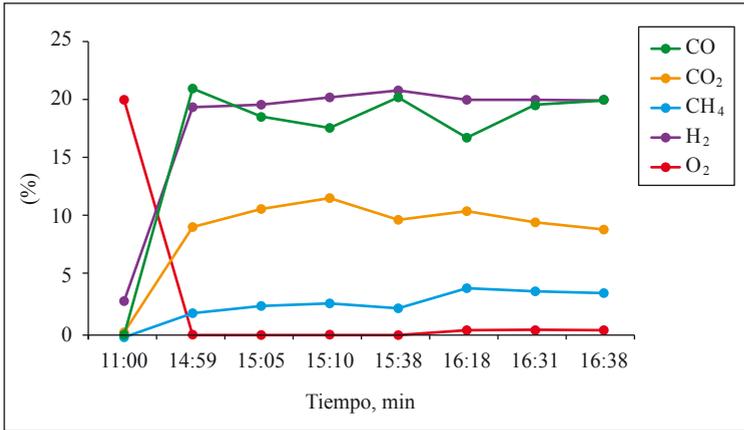


Figura 5. Comportamiento de los componentes del gas producido utilizando chips de madera del café.

Tabla 5. Composición promedio (v/v, %) y poder calorífico inferior del gas producido utilizando chips de madera del café, con longitud entre 10 y 40 mm y contenido de humedad de 12,5% (base húmeda).

	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂	O ₂	kJ.m ⁻³
Media	19,0	10,0	3,0	19,9	0,2	5.669,3
D.E.	1,5	0,9	0,8	0,4	0,2	297,1

Consumo de biomasa. La combustión de la biomasa genera la energía que se requiere en el proceso de gasificación. Al aumentar las cargas externas conectadas al equipo aumenta la producción de gas combustible y, en consecuencia, el consumo de biomasa. Para las cargas externas aplicadas, los consumos promedios de biomasa variaron entre 8,16 y 17,2 kg.h⁻¹, similares a los presentados por el fabricante para condiciones similares de operación del equipo. Para la carga externa máxima (18,2 kW) la potencia eléctrica generada es 20,0 kW, considerando eficiencia global del equipo del 25% (9). De acuerdo con este resultado el aprovechamiento de la potencia eléctrica generada con el equipo fue del 91%.

La madera seca producida en el zoqueo de un cafetal tecnificado (11), 16 t.ha⁻¹, serviría para la operación del equipo a plena carga durante 232,6 h, considerando el rendimiento

de astillas con las dimensiones requeridas, obtenido por Oliveros (17).

Flujo de gas combustible. El flujo de gas combustible producido en el gasificador, con el poder calorífico y concentración de alquitranes requeridos, debe permitir el correcto funcionamiento del motor de combustión interna del equipo. El flujo de gas combustible producido en el gasificador aumentó a medida que el flujo de aire suministrado en la zona de combustión y el flujo de biomasa aumentaron. Los promedios variaron entre 15,76 y 32,04 kg.h⁻¹.

Eficiencia térmica. Los promedios obtenidos fueron inferiores a los reportados para la gasificación de biomasa lignocelulósica en equipos de flujo descendente (14, 21). Los mayores valores se obtuvieron al aplicar las cargas externas más altas que, al exigir mayor potencia del motor de combustión

Tabla 6. Promedio y error estándar (EE) para las variables obtenidas en cada tratamiento para la evaluación de la UGEE.

Tratamiento	Eficiencia térmica		Consumo específico de biomasa		Producción específica de gas		Relación de equivalencia		Flujo de aire		Flujo de gas		Consumo de biomasa	
	%		kg.(kWh) ⁻¹		m ³ .kg ⁻¹ biomasa		$RE = \frac{\left(\frac{m_g}{m_b}\right)_{Experimental}}{\left(\frac{m_g}{m_b}\right)_{Estequimétrico}}$	kg.h ⁻¹		kg.h ⁻¹		kg.h ⁻¹		kg.h ⁻¹
T1	Media	59,69	1,21		2,32		0,23	9,29		16,34		8,16		
	EE	3,34	0,08		0,13		0,01	0,96		1,39		0,56		
T2	Media	47,31	1,47		1,84		0,24	13,57		20,52		12,66		
	EE	1,72	0,06		0,07		0,03	1,18		0,75		0,20		
T3	Media	63,80	1,11		2,48		0,25	15,69		29,19		13,73		
	EE	4,27	0,07		0,17		0,01	1,33		1,23		1,45		
T4	Media	52,03	1,41		2,02		0,25	10,13		15,76		8,85		
	EE	4,80	0,16		0,19		0,01	0,78		1,93		0,25		
T5	Media	62,15	1,14		2,42		0,27	11,90		20,69		9,92		
	EE	4,29	0,09		0,17		0,02	0,70		1,08		0,82		
T6	Media	54,21	1,27		2,11		0,21	17,67		32,04		17,20		
	EE	0,97	0,04		0,04		0,01	0,73		0,57		0,39		

interna, con mayor succión de aire, permitieron alcanzar temperaturas más altas en las zonas de combustión y reducción del reactor.

La mayor eficiencia (63,8%) se obtuvo aplicando la mayor carga externa (18,2 kW), utilizando biomasa con astillas con el 100% de las dimensiones recomendadas por el fabricante.

Las bajas eficiencias térmicas obtenidas, especialmente en el tratamiento T2, pueden atribuirse principalmente a las bajas temperaturas que se presentaron en la zona de reducción, inferiores a 600°C, que dieron

origen a gas combustible con alta concentración de alquitranes que ocasionaron daños al motor que se observan en la Figura 7.

La eficiencia térmica global del equipo podría aumentar utilizando parte de la energía que es disipada en el radiador del motor de combustión interna, que representa 32,2 kWh (38,6% de la energía entregada por la biomasa), en procesos como el secado del café (17).

Consumo específico de biomasa. Los promedios variaron entre 1,14 y 1,47 kg de biomasa.kWh⁻¹, dependiendo de la carga

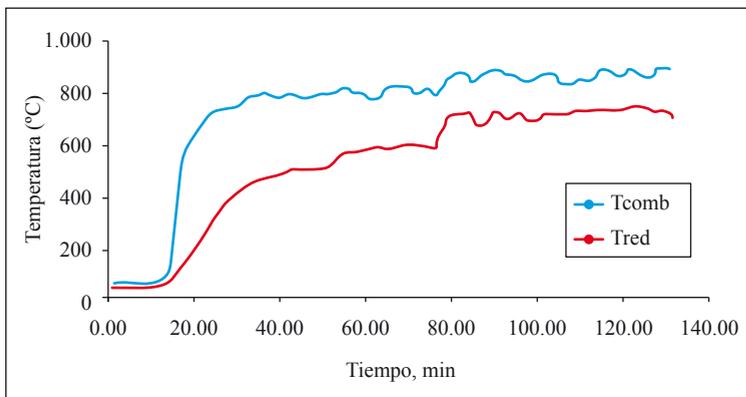


Figura 6. Comportamiento de la temperatura en las zonas de combustión (Tcomb) y reducción (Tred) del gasificador, utilizando biomasa con 85% de astillas del tamaño recomendado por el fabricante y tres motores eléctricos conectados a la UGEE.



Figura 7. a. Presencia de alquitranes en el múltiple de admisión del motor de combustión interna del equipo GEK 20 kWe y b. válvula impregnada con alquitranes.

externa conectada al equipo. *All Power Labs* (fabricante de la UGEE) reporta un valor promedio de $1,2 \text{ kg.kWh}^{-1}$ utilizando diferente biomasa lignocelulósica.

A partir de la madera de café seca y de astillas con el tamaño recomendado por el fabricante reportado por Oliveros (17), $4,0 \text{ t.ha}^{-1}$, con consumo específico promedio de biomasa ($1,27 \text{ kg.kWh}^{-1}$), se podrían procesar diariamente 15 toneladas de café cereza, considerando el uso de la tecnología Ecomill® 3000 (18) y secado mecánico (24). Este resultado podría ser de utilidad en proyectos de beneficiaderos comunitarios, especialmente en sitios distantes del sistema nacional interconectado.

Producción específica de gas. Los promedios variaron entre $1,84$ y $2,48 \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$ de biomasa, dependiendo de la carga externa conectada al equipo. Utilizando pulpa de café en un gasificador Ankur BG-10WW-NW7, reportan $2,3 \text{ m}^3$ de gas por $1,0 \text{ kg}$ de pulpa con humedad entre $5,2\%$ y $8,0\%$ (base húmeda) (16).

Relación de equivalencia. Los promedios variaron entre $0,21$ y $0,27$, en el rango

reportado para la gasificación de madera (7, 12) y del bagazo de la caña de azúcar (1).

El ANOVA para las variables de respuesta consumo de biomasa, eficiencia térmica y producción de gas mostró efecto de la interacción, es decir, su respuesta depende de la composición de la masa y de la carga externa conectada a la UGEE. De acuerdo con el análisis de contraste al 5%:

- El mayor consumo de biomasa se presentó cuando la masa utilizada contenía 85% de chips de la longitud recomendada por el fabricante y carga externa de $18,2 \text{ kW}$ (Figura 8).
- La mayor eficiencia térmica se obtuvo utilizando biomasa con el tamaño recomendado por el fabricante y carga externa de $18,2 \text{ kW}$ (Figura 9).
- La mayor producción de gas combustible (syngas) se obtuvo utilizando biomasa con el tamaño recomendado por el fabricante y carga externa de $18,2 \text{ kW}$ (Figura 10).

Con empleo de astillas de la madera del café se obtuvo gas combustible con poder

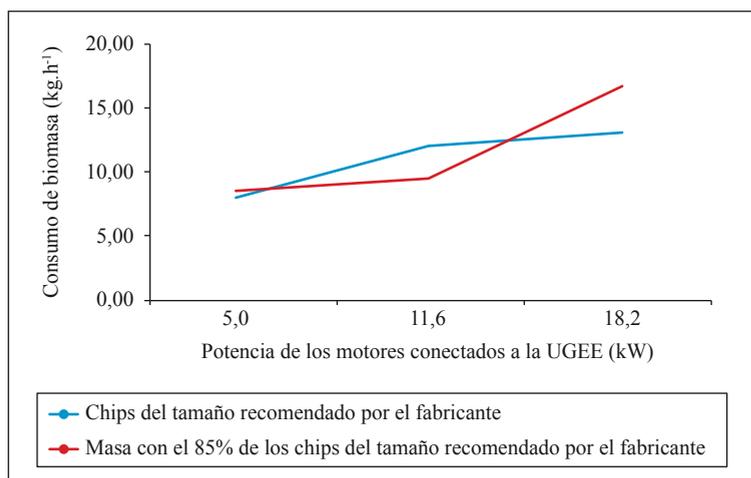


Figura 8. Comportamiento de la variable consumo de biomasa, de acuerdo al tamaño de los chips utilizados y la potencia de los motores conectados a la UGEE.

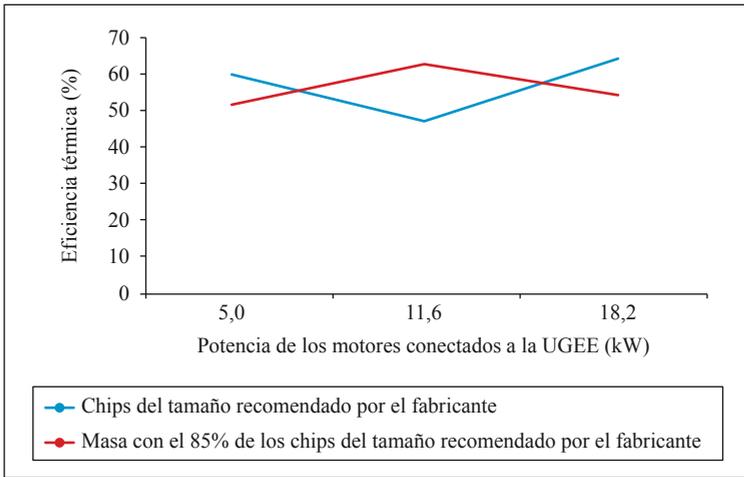


Figura 9. Comportamiento de la variable de respuesta eficiencia térmica, de acuerdo al tamaño de los chips utilizados y la potencia de los motores conectados a la UGEE.

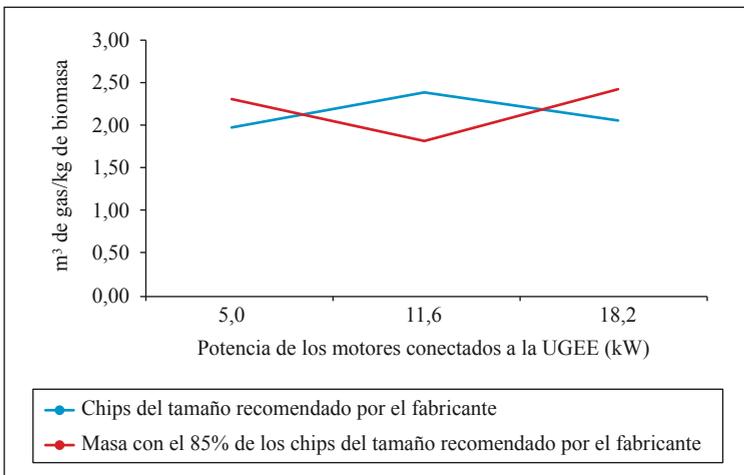


Figura 10. Comportamiento de la variable de respuesta producción de gas, de acuerdo al tamaño de los chips utilizados y la potencia de los motores conectados a la UGEE.

calorífico de $5.669,3 \text{ kJ.m}^3$, con composición promedio de CO , H_2 y CH_4 de 19,0%, 19,9% y 3,0% (v/v), respectivamente. La mayor producción de gas combustible (syngas), con mayor poder calorífico y menor concentración de alquitranes, por el craqueo térmico, se obtuvo cuando las temperaturas en las zonas de oxidación y reducción alcanzan valores entre $800 - 900^\circ\text{C}$ y $600 - 750^\circ\text{C}$, respectivamente. El gas combustible producido presentó alto contenido de alquitranes que causaron fallas en el funcionamiento del motor de combustión interna utilizado en el

equipo. El tamaño de la biomasa y la carga externa aplicada afectan el desempeño de la UGEE. Los mejores resultados en eficiencia térmica (63,8%) y producción de gas ($2,48 \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$ de biomasa) se obtuvieron utilizando chips de café en el tamaño recomendado por el fabricante y conectando a la UGEE de los tres motores eléctricos que en total representan 18,2 kW. Se requiere mejorar el sistema utilizado para retirar alquitranes en el gas combustible producido a niveles que permitan su operación sin presentar fallas y daños en el motor.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la fundación Borlaug y al Departamento de Agricultura de Estados Unidos por la beca otorgada, la capacitación recibida y la donación de la UGEE. Al doctor Akwasi Boateng y al ingeniero Mark Shaffer del Departamento de Agricultura de Estados Unidos por la orientación recibida durante el entrenamiento y la asesoría en el análisis de los gases producidos, a la doctora Esther C. Montoya por la asesoría estadística y al señor Ricardo Grisales por su colaboración para la realización de los ensayos.

LITERATURA CITADA

1. ARTEAGA P., L.E.; CASAS L., Y.; PÉREZ B., R.; RODRÍGUEZ M., L.; PERALTAS., L.M.; PRIETO G., J.O.; DEWULF, J. Determinación de la calidad energética y la composición del gas de síntesis producido con biocombustibles: Combustibles sólidos, bagazo de caña de azúcar. *Afinidad* 69(557):35-41. 2012.
2. ASOCAÑA. El sector azucarero colombiano, más que azúcar, una fuente de energía renovable para el país. [En línea]. Cali : La asociación, 2014. Disponible en internet: <http://www.asocana.org/documentos/2692014-90F926BD-00FF00,000A000,878787,C3C3C3,0F0F0F,B4B4B4,FF00FF,2D2D2D.pdf>. Consultado el 24 Junio de 2016.
3. BANCO MUNDIAL. Consumo de energía eléctrica (kWh per cápita). [En línea]. Washington : El banco, (s.f.). Disponible en internet: <http://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.ELEC.KH.PC>. Consultado en Mayo de 2015.
4. BASU, P. Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: Practical design and theory. 2a. ed. Londres : Academic press, 2011. 548 p.
5. CHAUDHURY, M.A. Development of a small downdraft biomass gasifier: A potential technology for developing countries as a source of decentralized power supply. Mauritius : Lambert academic, 2012. 102 p.
6. COUTO, N.; ROUBOA, A.; SILVA, V.; MONTEIRO, E.; BOUZIANE, K. Influence of the biomass gasification processes on the final composition of syngas. *Energy procedia* 36:596-606. 2013.
7. DOGRU, M.; HOWARTH, C.R.; AKAY, G.; KESKINLER, B.; MALIK, A.A. Gasification of hazelnut shells in a downdraft gasifier. *Energy* 27(5):415-427. 2002.
8. ENERGÍA ELÉCTRICA. Colombia. Ministerio de minas y energía. *Energía eléctrica*. [En línea]. Bogotá : El ministerio, 2015. Disponible en internet: <http://www.minminas.gov.co/documents/10180/614096/4-Energia.pdf/97e512a3-3416-4f65-8dda-d525aa616167>. Consultado en Mayo de 2015.
9. GARCÍA F., L.F. Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo. Bogotá : Universidad nacional de Colombia, 2011. 112 p. Tesis: Magister en ingeniería mecánica.
10. ERLICH, C.; FRANSSON, T.H. Downdraft gasification of pellets made of wood, palm-oil residues respective bagasse: Experimental study. *Applied energy* 88(3):899-908. 2011.
11. FARFÁN V., F.F. El zoqueo del café conserva el bosque nativo. Chinchiná : Cenicafé, 1994. 4 p. (Avances Técnicos No. 209).
12. GUO, F.; DONG, Y.; DONG, L.; GUO, C. Effect of design and operating parameters on the gasification process of biomass in downdraft fixed bed: An experimental study. *International journal of hydrogen energy* 30:1-9. 2014.
13. HIGMAN, C.; VAN DER BURGT, C. Gasification. 2a. ed. Texas : Gulf professional, 2008. 456 p.
14. JAYAH, T.H.; AYE, L.; FULLER, R.J.; STEWART, D.F. Computer simulation of a downdraft wood gasifier for tea drying. *Biomass and bioenergy* 25(4):459-469. 2003.
15. MCKENDRY, P. Energy production from biomass: Overview of biomass. *Bioresource technology* 83(1):37-46. 2002.
16. MELÉNDEZ D., J.B.; RODRÍGUEZ U., A.E.; URRUTIA C., G.A. Implementación de la tecnología de gasificación para operar en los beneficios de café. San Salvador : Universidad centroamericana José Simeón Cañas. Facultad de ingeniería y arquitectura, 2006. 111 p. Tesis: Ingeniero mecánico.
17. OLIVEROST, C.E. Evaluation of a gasifier using coffee wood. Chinchiná : Cenicafé, 2015. 40 p.

18. OLIVEROS T., C.E.; TIBADUIZA V., C.A.; MONTOYAR, E.C.; SANZ U., J.R.; RAMÍREZ G., C.A. Tecnología de bajo impacto ambiental para el lavado del café en proceso con fermentación natural. *Cenicafé* 65(1):44-56. 2014.
19. PARTHASARATHY, P.; SHEEBA N., K. Hydrogen production from steam gasification of biomass: Influence of process parameters on hydrogen yield a review. *Renewable energy* 66:570-579. 2014.
20. PERRY, R.H.; GREEN, D.W. *Perry's chemical engineers' handbook*. 6a. ed. New York : MacGraw Hill, 1984.
21. RAMAN, P.; RAM, N.K.; RUCHI, G. A dual fired downdraft gasifier system to produce cleaner gas for power generation: Design, development and performance analysis. *Energy* 54:302-314. 2013.
22. RAVJANSHI, A.K. *Biomass gasification: Alternative energy in agriculture*. Florida : CRC press, 1986.
23. RINCÓN, S.; GÓMEZ, A.; KLOSE, W. *Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial: Gasificación de carbonizados*. Kassel : Kassel university press, 2011. 120 p.
24. ROAM, G.; OLIVEROS T., C.E.; ÁLVAREZ G., J.; RAMÍREZ G., C.A.; SANZ U., J.R.; ÁLVAREZ H., J.R.; DÁVILA A., M.T.; ZAMBRANO F., D.A.; PUERTA Q., G.I.; RODRÍGUEZ V., N. *Beneficio ecológico del café*. Chinchiná : Cenicafé, 1999. 273 p.
25. ROMOO, N.; FLORES P., L.M.; TORO, A.F.; CANAS V., A. Evaluación de las propiedades fisicoquímicas y térmicas de tallos de café y su análisis económico para la producción de pellets como biocombustible sólido. *Ingeniería de recursos naturales y del ambiente*. 10:79-91. 2011.
26. RUIZ, J.A.; JUÁREZ, M.C.; MORALES, M.P.; MUÑOZ, P.; MENDÍVIL, M.A. Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers. *Renewable and sustainable energy reviews* 18:174-183. 2013.
27. SHARMA, A.K. Experimental investigations on a 20 kWe, solid biomass gasification system. *Biomass and bioenergy* 35:421-428. 2011.
28. SJAAB, L. VAN; KOPPEJAN, J. *The handbook of biomass combustion and co-firing*. Abingdon : Routledge, 2008.