


Evaluación de la incidencia de pellets y astillas de madera en el desempeño de un gasificador tipo “*downdraft*”

Evaluation of the incidence of pellets and wood chips in the performance of a “*downdraft*” type gasifier

Cindy Torres¹ • Marco Chaves² • Luis Urvina² • Roger Moya³ 

Abstract

The size, geometry, density and mechanical properties of the biofuel particles are important factors in the performance of any biomass gasification process. They influence the mass transfer rates of the reacting species just as the drying and the thermal decomposition rates in the rest of the system. This work evaluates the significant differences between two different feedstocks, wood pellets and woodchips, on the performance and efficiency of a pilot scale “*downdraft*” gasifier unit with a combined heat and power system. When using woodchips as feedstock, on average, the temperature profile of the pyrolysis zone was 147 ± 15 °C higher, while the pressure drop inside the reactor and its variability were lower. The Cold Gas Efficiency and Global Thermal Efficiency of the system were higher as well with the woodchips as feedstock, despite the fact that the calorific value of the synthesis gas produced from the wood pellets was 8.00 MJ/Nm^3 and the one obtained from the woodchips was slightly lower at 6.18 MJ/Nm^3 . At a power generation of 6.2 kW, the syngas and electrical energy yields, were also higher on average for the woodchips at 1.75 kg/kg and 564.50 kWh/t, compared to the wood pellets as feedstock at 1.40 kg/kg and 487.35 kWh/t respectively. The relationship between the electrical energy yield and the calorific value of the syngas flow was established by means of the Motor/Generator Efficiency, and it was within typical range for this type conversion systems, at 21.41 ± 3.23 % for the woodchips and 18.94 ± 3.68 % for wood pellets. In conclusion, even though the transport of the woodchips within system is more prone to clogging, the higher efficiency and better overall process performance obtained when using woodchips, makes it the preferred feedstock for the system compared to the wood pellets.

Key words: Pellets, biomass, energy production.

1. Escuela de Ingeniería Química / Centro de Electroquímica y Energía Química, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica; cindy.torres@ucr.ac.cr

2. BIOMATEC; San José, Costa Rica, marco.chaves@biomatec.net; luis.urvina@biomatec.net

3. Escuela de Ingeniería Forestal, Tecnológico de Costa Rica; Cartago, Costa Rica; moya@tec.ac.cr

Recibido: 31/05/2018

Aceptado: 03/09/2018

Publicado: 19/09/2018

DOI: 10.18845/rfmk.v15i1.3847

Resumen

En un proceso de gasificación la geometría de la biomasa es un factor necesario que considerar. El tamaño, forma y densidad de las partículas del biocombustible influyen en el transporte de las especies del sistema de reacción, velocidades de secado y descomposición térmica; los cuales son factores relacionados al desempeño general del proceso. Este trabajo evaluó las diferencias significativas que existen en el rendimiento y eficiencia del sistema de generación de energía eléctrica y térmica por la incidencia de dos geometrías en la biomasa de alimentación (pellets y astillas de madera), en el desempeño de un gasificador tipo “*downdraft*”. El perfil de temperatura de la zona de pirólisis fue en promedio (147 ± 15) °C mayor al utilizar astillas como alimentación en comparación con el uso de pellets. La caída de presión dentro del reactor fue menor en promedio, así como su variabilidad en el sistema, al utilizar astillas como alimentación; esto a pesar de que el poder calorífico del gas de síntesis obtenido fue levemente mayor para pellets (8,00 MJ/Nm³) que con respecto al obtenido con astillas (6,18 MJ/Nm³). Se obtuvo una Eficiencia de Gas Frío, así como la Eficiencia Térmica Global mayor al utilizar astillas de madera. La capacidad de aprovechamiento de la energía del syngas para producir potencia eléctrica, medido como la Eficiencia del Motor/Generador, estuvo dentro de los valores típicos para este sistema de conversión, y fue de ($21,41 \pm 3,23$) % para astillas y ($18,94 \pm 3,68$) % para pellets. Se obtuvo 564,50 kWh/t de rendimiento de proceso en términos eléctricos al emplear astillas, el cual fue mayor que al utilizar pellets (487,35 kWh/t), esto a una potencia de 6,2 kW. Con respecto al rendimiento de producción de gas de síntesis, con pellets fue menor con respecto a las astillas de madera (i.e. en promedio se produjo 1,75 kg de gas de síntesis por kilogramo de astillas, lo que significa un 25 % más que con pellets de madera). En conclusión, a pesar de que el manejo de astillas de maderas requiere ciertos cuidados para evitar el atascamiento dentro del sistema de conversión “*downdraft*” para producir gas combustible, en general las ventajas en proceso y eficiencias son mayores al utilizar madera en forma de astillas en comparación con pellets.

Palabras clave: Pellets, *downdraft*, biomasa, producción eléctrica.

Introducción

La biomasa es la principal fuente de energía renovable en todo el mundo, las estimaciones de implementación varían del 44 % al 65 % y la Agencia Internacional de Energía prevé que la capacidad de generación eléctrica global de la biomasa aumentará diez veces, de 50 GW

(Gigawatts) en el 2009 a 560 GW en el 2050 (Forestry & Natural Resources Development, 2014). Según el Plan de Expansión de la Generación Eléctrica 2016-2035 del ICE, la biomasa como fuente de generación tiene un potencial identificado de 445 MW de los cuales, solo se ha instalado 9 % (46,9 MW) que corresponden mayoritariamente al uso del bagazo y proyectos de biogás conocidos. El sector industrial usa intensivamente los combustibles fósiles, que cubren el 33 % de sus necesidades, para la generación de calor y vapor. El 50 % del consumo de ese sector proviene de biomasa (residuos vegetales y leña), utilizado en su mayor proporción por la industria de producción de alimentos (Ramírez y Solano, 2017).

A nivel mundial, el tipo más común de biomasa utilizado en los sistemas de transformación térmica (calderas y gasificadores) es la madera astillada o astillas, el cual es un subproducto que normalmente proviene de aserraderos. Hay muchas fuentes de madera de las cuales se obtiene este tipo de combustible, ya que existen muchas maneras en que la madera puede ser cosechada, procesada, cargada, transportada y recibida, aunque cada fuente determina la calidad general de la astilla combustible (BERC, 2011). En contraste, se considera que al aprovechar energéticamente el residuo forestal, como las ramas y troncos de madera, tiene una serie de desventajas con respecto a otros combustibles por su baja densidad y dificultad de manejo, ya que mientras un combustible fluido es fácil de transportar y de manejar, residuos madereros, por ejemplo, no son susceptibles de ser aprovechados en una caldera, y sus usos se reducen a sistemas tradicionales, como las chimeneas (González, 2012).

Una de las posibilidades que se plantean para evitar este tipo de problemas es la densificación de la biomasa, es decir, su compactación para la obtención de productos combustibles densificados con un alto poder calorífico y que sean homogéneos tanto en propiedades como en dimensiones. Entonces, la densificación de biomasa (también llamado pelletización) es un proceso de aplicación de una fuerza mecánica a los residuos de biomasa, como aserrín, afeitado, astillas o placa, para compactarlos en partículas sólidas de tamaño uniforme, tales como pellets, briquetas y troncos. Los objetivos de la densificación de la biomasa es: aumentar la densidad volumétrica de (40 - 200) kg/m³ a una final de (600 - 1400) kg/m³, para facilitar el almacenamiento, la manipulación, el costo de transporte, y para disminuir el contenido de humedad (McMullen, 2005).

Para esta investigación se estudió el aprovechamiento de estos dos tipos de combustibles forestales empleando la tecnología de gasificación con aire, el cual es un proceso termoquímico de oxidación parcial en el cual

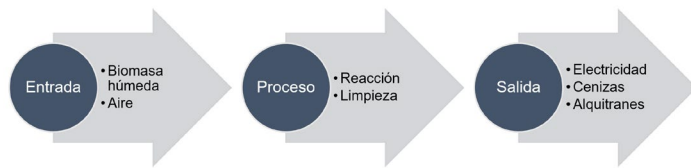


Figura 1. Proceso de gasificación de biomasa para la generación de energía eléctrica.

Figure 1. Biomass gasification process for the generation of electric power.

sustancias con carbono (biomasa, carbón y plásticos) se convierten en gas en presencia de un agente gasificante (aire, vapor, oxígeno, CO₂ o una mezcla de estos). El gas generado, comúnmente referido como syngas (gas de síntesis), consiste principalmente de H₂, CO, CO₂, N₂ y pequeñas partículas de char (residuos de carbono sólidos), ceniza y aceites (Ruiz et al., 2013). La versatilidad de la gasificación es que se puede usar para producir syngas, H₂ y CO, que a partir de ellos se pueden producir combustibles líquidos, polímeros y, por

lo tanto, este proceso puede enfrentar la demanda de electricidad, la demanda de energía térmica y síntesis de compuestos. Añadir que el syngas generado puede ser transportado fácilmente sin perder su gran densidad energética, permitiendo una generación de electricidad no centralizada (Ruiz et al., 2013).

El proceso de gasificación de biomasa para la generación de energía eléctrica se resume en la figura 1. Durante las diferentes etapas de transformación termoquímica de la materia que se muestran en este esquema existe una eficiencia y un rendimiento, los cuales se explican en el cuadro 1. Por lo tanto, este estudio se basó en obtener dichos valores y poder compararlos entre los dos combustibles forestales y evaluar el desempeño de cada proceso.

Materiales y métodos

La gasificación de la biomasa se realizó en el Laboratorio de Biomateriales, el cual forma parte de la Escuela de

Cuadro 1. Parámetros requeridos para evaluar el desempeño de un gasificador de biomasa (Torres et al., 2016).

Table 1. Parameters required to evaluate the performance of a biomass gasifier (Torres et al., 2016).

Parámetro	Descripción
Conversión de carbono	La razón entre el carbono remanente en el sistema en cenizas más alquitrán y el carbono que ingresa al sistema en la biomasa alimentada. Esto, pues bajo condiciones de gasificación típicas, una porción del carbono que entra con la biomasa abandona el reactor sin convertir a fase gaseosa.
Razón biomasa/agente oxidante	Se define como la razón entre el flujo de biomasa seca que ingresa al sistema y el flujo de oxígeno que ingresa al sistema de reacción. Lo cual indica la capacidad del agente gasificante, el oxígeno, para lograr la conversión termoquímica alcanzada de la biomasa que ingresa al reactor.
Razón equivalente	Es la razón entre el flujo de aire que ingresa al sistema y el flujo de aire requerido para una combustión estequiométrica de la biomasa, lo cual indica el grado de combustión parcial, esencial para evaluar el desempeño de la oxidación de la biomasa como fuente de energía para el proceso de reducción dentro del reactor.
Rendimiento eléctrico base húmeda	Se define en este trabajo como la potencia real generada en una hora, entre el flujo de biomasa consumido en el mismo período a una condición de operación dada, las unidades son kWh/t (Energía entregada por tonelada de biomasa húmeda). La magnitud de este valor funciona para estimar cantidades requeridas de biomasa para satisfacer una demanda energética empleando un sistema de gasificación similar.
Rendimiento de syngas	La razón entre el flujo de syngas producido en kg/h y el flujo de biomasa alimentada también en kg/h. Las unidades son kilogramo de biomasa por kilogramo de biomasa. Indica la capacidad de conversión de la biomasa en el gas producto o syngas, una magnitud necesaria para definir la viabilidad operativa del proceso.
Eficiencia térmica global	Es un parámetro que permite conocer el desempeño de conversión de la energía térmica disponible a electricidad, por tanto, se define como el porcentaje de potencia eléctrica generada en MJ/h, según el contenido energético de la biomasa también en MJ/h.
Eficiencia de gas frío	Se define como el porcentaje del contenido energético de la biomasa y el contenido energético del syngas en porcentaje. Este parámetro indica la capacidad del sistema de reacción para aprovechar la energía disponible en la biomasa y transformarla en energía disponible en el gas producto.
Eficiencia de motor/generador	El porcentaje de energía entregada por la unidad en MJ/h con respecto al contenido energético del syngas producido en MJ/h que ingresa al motor. Se obtiene al dividir la eficiencia térmica global entre la eficiencia de gas frío. Esta eficiencia indica la capacidad de aprovechamiento energético del motor y generador que acarrea el syngas para ser convertido en energía eléctrica fija y estable.

Ingeniería Forestal del Tecnológico de Costa Rica. El gasificador empleado consistió en el modelo Power Palet PP20 (figura 2), de fabricación estadounidense por la empresa All Power Labs. Las especificaciones técnicas más importantes de la planta piloto se muestran en el cuadro 2.

Para obtener los parámetros que describen el desempeño del proceso de gasificación tanto en sistema de reacción como en el sistema de generación de energía eléctrica se realizaron mediciones continuas de distintas variables dentro de la planta. Para ello se adaptó el módulo con una serie de sensores/transmisores que permitieron adquirir los datos de proceso en línea, con insumos de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica. En el cuadro 3 se detalla la instrumentación utilizada para cada tipo de variable en el sistema.

Ambos combustibles fueron suministrados por la empresa Pelletics, con el objetivo de determinar sus propiedades y así lograr fijar la mayor cantidad de variables dentro del experimento, se les realizaron pruebas de caracterización fisicoquímica. La propiedad y el método empleado se muestran en el cuadro 4.

Para evaluar la incidencia de la geometría de la biomasa se realizó un diseño experimental de un factor y dos

niveles para distinguir las diferencias significativas que existe al alimentar pellets o astillas de madera en una unidad de gasificación con un reactor “downdraft”. El diseño se conforma de la siguiente manera:

- Factor de estudio: Geometría de biomasa forestal.
- Niveles: 1. Astillas de madera y 2. Pellets de madera.
- Variables fijas: el contenido de humedad (16 % en base húmeda), tiempo de corrida (4 h motor) y carga eléctrica del generador (6.2 kW).
- Variables no controlables: la humedad relativa del ambiente, temperatura ambiente y composición fisicoquímica.
- Variables de respuesta: la caída de presión en el lecho del reactor, caída de presión en sistema de limpieza, la composición del syngas, temperaturas en el sistema, flujos de: biomasa, aire, syngas, cenizas y alquitranes.

No se trabajó a potencia máxima, pues el objetivo fue evaluar el desempeño del proceso comparando la geometría de los combustibles, lo cual aplica a cualquier valor de potencia eléctrica. A partir de todas las variables de respuesta descritas se obtienen los

Cuadro 2. Especificaciones técnicas de la planta piloto Power Palet PP20 empleada en el estudio.

Table 2. Technical specifications of the Power Palet PP20 pilot plant used in the study.

Parámetro	Valor
Régimen de potencia continua (kW)	15@50Hz/18@60Hz
Tiempo máximo de operación (h)	12
Tamaño de la biomasa (mm)	12-40
Contenido de humedad base seca (%)	5-30
Tipo de motor	HM Vortec
Tipo de generador	Mecc Alte NPE32-E/4 12 wire

Cuadro 3. Variables medidas e instrumentación utilizada.

Table 3. Measured variables and instrumentation used.

Variable	Instrumentación
Flujo de aire	Medidor de flujo tipo Vortex
Humedad relativa y temperatura aire	Vaisala Humidity and Temperature Probe, serie HMP110
Flujo de syngas	Medidor tipo orificio (diseño propio)
Caídas de presión	Sensores de presión diferencias Dwyer
Temperaturas	Termocuplas AF WATLOW
Adquisición de datos	Chasis y módulos National Instruments
Composición en syngas	MCA 100 Syn Portable MULTICOMPONENT ANALYZER
Potencia y energía	Analizador de redes Fluke 435



Figura 2. Planta piloto gasificador con reactor de lecho descendente (TEC).

Figure 2. Gasifier pilot plant with descending bed reactor (TEC).

parámetros que permiten evaluar el desempeño de un proceso de gasificación en el cuadro 4 se describen cada uno de estos parámetros.

Resultados y discusión

En la primera etapa del proyecto se caracterizaron ambos combustibles, los valores promedio para cada propiedad determinada en los diferentes ensayos realizados por triplicado se aprecian en el cuadro 5. No existió variación significativa entre las propiedades fisicoquímicas de los dos combustibles estudiados; esto se debió a que ambos combustibles son de origen forestal y sus propiedades no deberían variar sustancialmente, como se obtuvo también en el estudio de caracterización de especies forestales nacionales por [Tenorio et al., \(2016\)](#).

De los resultados de las pruebas t-Student realizadas a los valores determinados para cada propiedad se concluyó que para el contenido de cenizas y para el poder calórico existe evidencia estadística para concluir que existe una diferencia significativa entre ambas geometrías con respecto a estas propiedades. Para el poder calórico se obtuvo que hay $(17,41 \pm 0,18)$ MJ/kg disponibles en las astillas de madera y en pellets hay un aumento de 1 MJ/kg aproximadamente, lo cual implica que los pellets de madera utilizados poseían una mayor cantidad de

Cuadro 4. Metodologías empleadas y lugares de realización de las pruebas de caracterización.

Table 4. Methodologies used and locations for the characterization tests.

Propiedad	Método
Contenido de humedad	ASTM E871–82: Método de prueba estándar para el análisis de la humedad de los combustibles de madera en partículas
Contenido de cenizas	ASTM D1102–84: Contenido de cenizas para de madera y productos de madera
Contenido de materias volátiles	ASTM D1762-84: Método de prueba estándar para el análisis químico de carbón
Contenido de carbono fijo	ASTM D1762-84: Método de prueba estándar para el análisis químico de carbón
Contenido de metales	Espectrómetro de fluorescencia de rayos X de dispersión de energía S2 RANGER (EDXRF): Se utilizó la técnica de cuantificación estándar EQUA ALL
Composición elemental	Según la norma EN 15104 para su medición. Para el azufre y el cloro se describen diferentes procedimientos en la norma EN 15289.
Poder calórico	Guía de Laboratorio: Calor de combustión del curso IQ-0331 Medición y Tratamiento de Datos Experimentales, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Costa Rica.

energía disponible por unidad masica, lo cual es debido a una compactación de fibras y una mayor disponibilidad de contenido de carbono por unidad másico, resultados intrínsecos del proceso de densificación.

El análisis del balance de masa es esencial para la obtención de las variables requeridas para la evaluar el desempeño del proceso y, como se muestra en la figura 1, existen dos corrientes que ingresan al sistema: la de biomasa y la de aire. La primera se calculó como la razón entre la biomasa consumida y el tiempo total de operación con motor. Para la segunda se empleó el medidor de flujo tipo vortex, junto a la medición de temperatura realizada por el Vaisala, se calculó el flujo másico de aire que se inyecta al sistema de reacción como agente gasificante. El flujo de syngas se midió con un medidor de flujo de tipo orificio de manera continua y el flujo de cenizas fue cuantificado posterior a la corrida en operación de limpieza y mantenimiento. Con todos estos datos se resolvió un balance de masa global con una serie de balances elementales, ya que el gasificador es un sistema donde intervienen reacciones químicas y a pesar de que las especies en cada corriente varien, el número de átomos de cada elemento no lo harán. Los resultados se observan en el cuadro 6.

Cuadro 5. Resultados de caracterización fisicoquímica de las biomásas estudiadas.

Table 5. Results of physicochemical characterization of studied biomasses.

Variable	Astillas	Pellets
Contenido de cenizas en base seca A (% m/m)	0,985	1,097
D.std. Contenido de cenizas en base seca (% m/m)	0,031	0,026
Contenido de humedad en base húmeda WH (% m/m)	16,331	15,882
D.std. Contenido de humedad en base húmeda (% m/m)	0,452	0,913
Contenido de humedad en base seca DH (% m/m)	14,034	13,703
D.std. Contenido de humedad en base seca (% m/m)	0,333	0,682
Contenido de materias volátiles en base seca V (% m/m)	79,893	80,242
D.std. Contenido de materias volátiles base seca (% m/m)	0,158	0,272
Contenido de carbono fijo en base seca FC (% m/m)	4,976	5,070
D.std. Contenido de carbono fijo en base seca (% m/m)	0,457	0,887
Poder calórico PC (MJ/kg)	17,413	18,317
D.std. Poder calórico (MJ/kg)	0,184	0,149

La medición en varios puntos de la temperatura también permitió apreciar diferencias dentro del proceso de gasificación de las biomásas empleadas. Esto, pues el perfil de temperatura dentro del reactor está relacionado directamente con el desempeño del proceso de descomposición térmica de la biomasa, pues las reacciones de gasificación son en su mayoría endotérmicas. Como se aprecia en el Cuadro 7, durante las pruebas experimentales, en la zona de restricción, sección donde ocurren la mayor cantidad de reacciones de gasificación (crackeo extensivo de corrientes gaseosas, líquidas y sólidas en CO, H₂, CO₂, CH₄ y subproductos) se obtuvieron temperaturas de (804,19 ± 36,93) °C con astillas y de (731 ± 82,99) °C con pellets. Se obtuvo un perfil de más bajas temperaturas al emplear pellets que al emplear astillas de madera, lo cual indica en este primer nivel que el rendimiento del proceso fue mejor con las astillas que con pellets, pero esto se debe respaldar con las mediciones de composición del syngas y con los valores de rendimientos y eficiencias que se discutirán posteriormente.

La composición de los diferentes compuestos en el syngas es un aspecto importante para estudiar el desempeño de un combustible biomásico en un proceso

Cuadro 6. Flujos de corrientes que ingresan y salen del sistema de reacción.

Table 6. Current flows entering and leaving the reaction system.

Variables	Astillas	Pellets
Flujo de biomasa B (kg/h)	11,04	12,75
D.std. Flujo de biomasa B (kg/h)	0,03	0,03
Flujo de aire A (kg/h)	11,23	9,48
D.std. Flujo de aire A, (kg/h)	1,74	0,97
Flujo de syngas S (kg/h)	19,36	16,60
D.std. Flujo de syngas S (kg/h)	5,09	3,93
Acumulación de cenizas del reactor X (kg/h)	0,38	0,78
D.std. Acumulación de cenizas del reactor X (kg/h)	0,01	0,02
Acumulación de cenizas del ciclón Y (kg/h)	0,08	0,15

Cuadro 7. Temperaturas promedio en el sistema de reacción.

Table 7. Average temperatures in the reaction system.

Variables	Astillas	Pellets
Temperatura aire a la de entrada Ta (°C)	34,19	31,49
D.std. Temperatura aire de entrada (°C)	1,69	0,89
Temperatura promedio pirólisis T _{piro} (°C)	329,27	182,11
D.std. Temperatura promedio pirólisis (°C)	42,32	41,11
Temperatura en zona de restricción Tr _{st} (°C)	804,19	731,69
D.std. Temperatura en zona de restricción (°C)	36,93	82,99
Temperatura en zona de reducción T _{red} (°C)	584,99	514,24
D.std. Temperatura en zona de reducción (°C)	52,27	19,58
Temperatura a la salida del gasificador T _{gas} (°C)	373,71	348,64
D.std. Salida del gasificador (°C)	19,95	16,47

de gasificación. El reporte de los valores de composición se puede realizar de dos maneras: en base limpio y seco, el cual no incluye la composición de alquitranes, ni de agua ni de oxígeno; o limpio y húmedo, sin incluir alquitranes ni oxígeno, pero sí agua. Se reportaron ambos en base libre de oxígeno, pues, aunque se procuró que la línea instalada para la toma de la muestra de syngas estuviera sellada, el ingreso de aire fue inevitable. En el cuadro 8 se muestran los valores de composición del

Cuadro 8. Composición del syngas seco y en base libre de oxígeno.**Table 8.** Composition of dry and oxygen-free base syngas.

Variables	Astillas	Pellets
Composición de monóxido de carbono CO (% v/v)	25,11	27,96
D.std. Composición de monóxido de carbono CO (% v/v)	1,24	1,59
Composición de metano CH ₄ (% v/v)	4,70	10,06
D.std. Composición de metano CH ₄ (% v/v)	0,56	1,88
Composición de hidrógeno H ₂ (% v/v)	16,42	13,37
D.std. Composición de hidrógeno H ₂ (% v/v)	0,83	3,65
Composición de dióxido de carbono CO ₂ (% v/v)	12,03	12,01
D.std. Composición de dióxido de carbono CO ₂ (% v/v)	1,47	1,36
Temperatura a la salida del gasificador T _{gas} , (°C)	373,71	348,64
D.std. Salida del gasificador, (°C)	19,95	16,47

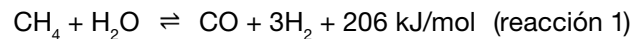
syngas en base limpia y seca. Las composiciones de monóxido de carbono e hidrógeno, (los compuestos que en mezcla se denominan gas de síntesis, gas producto o syngas), son las más importantes que se deben analizar.

En detalle, la composición de monóxido de carbono para astillas fue de (25,11 ± 1,24) % y para pellets de (27,96 ± 1,59) %, por lo cual, según la desviación estándar asociada a las mediciones, para ambos niveles no existieron diferencias en el contenido de monóxido de carbono del syngas para ambas biomásas. Para el contenido de hidrógeno en pellets, se obtuvo 3,65 %, valores más bajos que al alimentar astillas. Lo cual concuerda con una mayor formación de metano, según [Kumar, Jones, & Hanna, \(2009\)](#) a temperaturas superiores a (750 - 800) °C, la naturaleza endotérmica de las reacciones de producción de H₂ (reacción de reformado de metano en vapor, reacción 1 y la reacción heterogénea agua-gas, reacción 2) resulta en un aumento del contenido de H₂ y una disminución del contenido de CH₄ con un aumento de la temperatura. Contrario a esta condición, se reportaron valores entre 690 °C y 750 °C en la zona de restricción al operar con pellets. Mencionar que a temperaturas superiores a los (850 - 900) °C, dominan el reformado de metano con vapor y las reacciones de Boudouard (reacción 3), lo que da lugar a aumentos en el contenido de CO. La alta temperatura también favorece la destrucción y el reformado del alquitrán (reacción 4) que conduce a una disminución del contenido de alquitrán y un aumento la eficiencia del proceso.

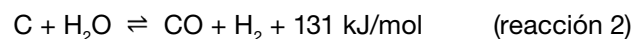
Cuadro 9. Composición del syngas húmedo y en base libre de oxígeno.**Table 9.** Composition of moist and oxygen-free base syngas.

Variables	Astillas	Pellets
Composición de monóxido de carbono CO (% v/v)	23,52	26,33
D.std. Composición de monóxido de carbono CO (% v/v)	1,21	1,58
Composición de metano y CH ₄ (% v/v)	4,40	8,97
D.std. Composición de metano CH ₄ (% v/v)	0,54	1,65
Composición de hidrógeno H ₂ , % v/v	15,31	13,38
D.std. Composición de hidrógeno H ₂ (% v/v)	0,80	3,46
Composición de dióxido de carbono CO ₂ (% v/v)	11,24	11,36
D.std. Composición de dióxido de carbono CO ₂ (% v/v)	1,40	1,35
Composición de nitrógeno N ₂ , % v/v	38,90	34,68
D.std. Composición de nitrógeno N ₂ (% v/v)	2,49	3,67
Composición de vapor de agua H ₂ O (% v/v)	7,09	5,28
D.std. Composición de vapor de agua H ₂ O (% v/v)	0,75	0,62

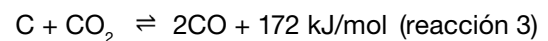
Reacción de reformado de metano en vapor



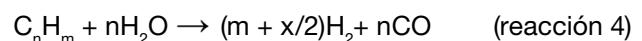
Reacción heterogénea agua-gas



Reacción de Boudouard



Reformado de alquitrán en vapor



La segunda hipótesis está ligada a la primera, ya que el tiempo de residencia de las partículas sólidas dentro del

Cuadro 10. Corrientes energéticas dentro del sistema para ambos tipos de biomasa.

Table 10. Energy currents within the system for both types of biomass.

Variabes	Astillas	Pellets
Poder calórico syngas por volumen Lv (MJ/Nm ³)	6,18	8,00
D.std. Poder calórico syngas por volumen LHV (MJ/Nm ³)	0,25	0,76
Contenido energético syngas Es (MJ/h)	105,47	118,94
D.std. Contenido energético LHV syngas (MJ/h)	15,44	22,81
Contenido energético biomasa seca Eb (MJ/h)	147,43	180,76
D.std. Contenido energético LHV biomasa seca (MJ/h)	3,22	3,74
Potencia Ep (MJ/h)	22,42	22,32
D.std. Potencia (MJ/h)	0,41	0,25
Temperatura a la salida del gasificador Tgas (°C)	373,71	348,64
D.std. Salida del gasificador (°C)	19,95	16,47

reactor estuvo afectado por la acción del agitador a la base del mismo, ya que se configuró el equipo para que este componente se activara con mucha más frecuencia con pellets que al emplear astillas de madera y evitar un incremento sustancial en la caída de presión. Se realizó esta modificación debido a la desintegración de algunos pellets en la zona de combustión, provocando atascamientos en esta zona en específico. Por lo tanto, antes de configurar la nueva frecuencia de agitación, cuando la parrilla agitaba, casi de inmediato, se liberaba el atascamiento y parte del material no combustionado caía a una zona de reducción vacía, ya que, al no descender biomasa de forma continua, el material en la zona se consumía sin reponerse, fenómeno que provocaba que la temperatura disminuyera hasta 200 °C a la base del reactor zona en cuestión de (20-30) s aproximadamente. Aun aumentando la frecuencia de agitación, esta situación dentro del reactor sucedía, pero en menores magnitudes, por lo que durante la operación con pellets de madera no solo se afectó el tiempo de residencia de las partículas, sino que también el perfil térmico dentro del reactor, pues este cambiaba abruptamente en manera casi periódica, lo cual en última instancia afectó los equilibrios de las reacciones y por ende la producción de gas combustible con altas composiciones de hidrógeno al alimentar con astillas el gasificador.

En adición, reportar en base húmeda la composición del syngas, es decir cuando se suma el porcentaje de agua en la corriente gaseosa, obtenida según Ley de Raoult, es una manera más acertada de caracterizar la corriente

Cuadro 11. Eficiencias del proceso de gasificación para obtención de energía eléctrica para los dos tipos de biomasa

Table 11. Deficiencias of the gasification process to obtain electricity for the two types of biomass.

Variabes	Astillas	Pellets
Eficiencia gas frío (syn/bio) eCGE (%)	71,46	66,12
D.std. Eficiencia gas frío CGE (syn/bio), %	10,58	12,76
Eficiencia térmica global (pot/bio) GTE, %	15,21	12,36
D.std. Eficiencia térmica global TE (pot/bio), %	0,44	0,29
Eficiencia del generador/motor (pot/syn) EGE, %	21,41	18,94
D.std. Eficiencia del generador/motor EE (pot/syn), %	3,23	3,68

gaseosa, pues integra la mayoría de sus componentes. En el cuadro 9 se muestran los valores de composición incluyendo el vapor de agua. Como se esperaba, el monóxido de carbono, el dióxido de carbono producido para ambos tipos de biomasa fue altamente similar, al igual que el nitrógeno presente. Como ya se mencionó, el contenido de metano aumentó al alimentar pellets (8,97 % en pellets y 4,40 % en astillas) sacrificando el contenido de hidrógeno en la mezcla.

El diseño experimental realizado planteó variar la geometría de la biomasa y evaluar su incidencia en el desempeño en un proceso de gasificación que culminara en producción de energía eléctrica a partir de la combustión del gas combustible generado. Para completar este objetivo se midieron una gran cantidad de variables que ya se discutieron, que permitieron el cálculo de los diferentes parámetros que evalúan el desempeño de un gasificador. Primeramente, se analizó el papel del aire como agente gasificante, pues este suministró el O₂ para la combustión e influyó en el tiempo de residencia de la biomasa, pues al variar la cantidad de suministro de O₂ se controla el grado de combustión que, a su vez, afecta a la temperatura de gasificación, fenómeno observado en las corridas con pellets de madera: flujo bajo de aire y bajas temperaturas en el reactor. Por lo tanto, una mayor velocidad de flujo de aire da como resultado una temperatura más alta que conduce a una mayor conversión de biomasa y a una mayor calidad de combustible. Sin embargo, un grado excesivo de combustión, por otra parte, da lugar a una disminución del contenido energético del gas producido porque una parte de la energía de la biomasa (producto de la pirólisis) se gasta durante la combustión. Entonces, un exceso de flujo de aire reduce el tiempo de residencia, lo que provoca una disminución en el grado de conversión de biomasa.

Cuadro 12. Rendimientos del proceso de gasificación para los dos tipos de biomásas.

Table 12. Yields of the gasification process for the two types of biomasses.

Variabes	Astillas	Pellets
Rendimiento eléctrico base húmeda RWH (KWh/t)	564,50	487,35
D.std. Rendimiento eléctrico base húmeda (KWh/t)	10,53	5,57
Rendimiento eléctrico base seca RDH, KWh/t	674,68	579,24
D.std. Rendimiento eléctrico base seca, (KWh/t)	13,08	7,34
Rendimiento de syngas/biomasa Rs,b (kg/kg)	1,75	1,31
D.std. Rendimiento de syngas/biomasa alim (kg/kg)	0,46	0,31
Rendimiento de gas limpio y seco en base húmeda (Nm ³ /kg)	1,55	1,18
D.std. Rendimiento de gas limpio y seco en base húmeda (Nm ³ /kg)	0,31	0,29
Temperatura a la salida del gasificador Tgas (°C)	373,71	348,64
D.std. Salida del gasificador (°C)	19,95	16,47

Un primer parámetro de desempeño del proceso para evaluar este fenómeno y el papel del agente gasificante es la razón biomasa/agente oxidante, valor que indica los kilogramos de biomasa seca y sin cenizas que ingresaron al sistema por kilogramo de oxígeno que ingresa por la corriente de aire. A la hora de gasificar pellets de madera, se requirió de menos cantidad de oxígeno, un 26 % de diferencia específicamente. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, el flujo

de biomasa fue mayor al usar pellets, y el flujo de aire fue menor, lo cual indica que no se aprovechó el combustible durante el proceso de combustión parcial dentro de reactor, provocando temperaturas menores dentro del reactor que como consecuencia principal fue la mejor producción de syngas con un menor contenido de hidrógeno y una mayor producción de cenizas que se removieron del sistema. El siguiente parámetro es la razón equivalente, el cual es relación de equivalencia que se utiliza comúnmente para indicar cuantitativamente si una mezcla de oxidante/combustible es rica, pobre o estequiométrica. Si es mayor que uno la mezcla es rica, menor que uno es pobre e igual a uno es una mezcla estequiométrica. Es decir, a medida que disminuye la cantidad de oxígeno, la mezcla de combustible y aire se vuelve rica en combustible ($Z_{eq} > 1$) con el resultado de que el CO₂ disminuirá y al mismo tiempo el CO aumentará (Jangsawang, Laohalidanond & Kerdsuwan, 2015).

El propósito del proceso de gasificación es producir un gas de síntesis ajustando la relación de equivalencia y la temperatura del agente de gasificación. Estos parámetros son críticos para optimizar el proceso. Jangsawang, Laohalidanond & Kerdsuwan (2015), identificaron dos casos distintos de equilibrio químico en el proceso de gasificación. El primero está con el exceso de carbono presente en el proceso de gasificación, mientras que el segundo abarca el exceso de agente de gasificación con todo el gasificado. Un caso único en el punto entre estos dos casos se identifica donde el carbono está completamente gasificado sin exceso del agente de gasificación.

El valor promedio de la razón equivalente para astillas de madera es cercano a 1, con un valor de $(1,69 \pm 0,09)$, y es menor que el encontrado al gasificar pellets de madera $(2,29 \pm 0,08)$, lo cual indica que la atmósfera dentro del reactor al alimentar astillas de madera fue

Cuadro 13. Resultados de pruebas t-Student para datos de parámetros de desempeño de planta piloto.

Table 13. Student t-test results for pilot plant performance parameter data.

Parámetro	Grados de libertad	Estadístico t	Valor crítico de t (dos colas)	P(T<=t) dos colas	Condición
Conversión de carbono	4	2,236	2,776	0,111	No hay evidencia de diferencia
Razón equivalente	4	3,550	2,776	0,038	No hay evidencia de diferencia
Eficiencia de Gas Frío	4	0,790	2,776	0,487	No hay evidencia de diferencia
Eficiencia Térmica Global	4	6,910	2,776	0,002	Rechaza hipótesis nula
Eficiencia Generador/ Motor	4	1,303	2,776	0,262	No hay evidencia de diferencia
Rendimiento eléctrico base húmeda	4	4,400	2,776	0,022	Rechaza hipótesis nula, hay diferencia
Rendimiento de syngas/ biomasa	4	4,469	2,776	0,021	Rechaza hipótesis nula, hay diferencia

cercana a la ideal, donde se gasificó la biomasa sin un exceso considerable de agente gasificante, lo cual indica un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles: la biomasa como combustible y el aire como agente gasificante para producir syngas de manera más eficiente.

Estas condiciones de ineficacia de descomposición térmica de los pellets de madera se reflejan también en una conversión de carbono menor con respecto a astillas de madera. Los resultados estadísticos de la caracterización fisicoquímica determinaron que ambas biomásas son fisicoquímicamente similares; sin embargo, el proceso de descomposición térmica dentro del reactor de lecho descendente fue más ineficiente cuando se utilizaron pellets de madera como combustible. Pues existió un 20 % aproximadamente de diferencia en la conversión de carbono entre una geometría y la otra: $(86,38 \pm 0,52)$ % para astillas y $(67,99 \pm 0,84)$ % para pellets, es decir una gran cantidad de carbono en los pellets no logró participar en los mecanismos de reacción dentro del reactor y se acumuló en las cenizas y en el biochar, ambos posteriormente eliminados del sistema.

Para el cálculo de los otros parámetros (eficiencias y rendimientos) se deben calcular las corrientes energéticas a partir de los flujos másicos y los poderes calóricos respectivos. Existen tres corrientes: la energía que contiene el syngas, que se calculó utilizando las composiciones promedio de sus compuestos y el poder calórico teórico de cada uno. Para la biomasa se utilizó el poder calórico inferior, el cual excluye el calor de condensación del agua producida, y el flujo de biomasa. La tercera corriente energética es la potencia entregada, que se mide en kW, entonces fue solo realizar un cambio de unidades a MJ/h. Los resultados se muestran en el cuadro 10. Estos valores de flujos energéticos permitieron calcular las diferentes eficiencias que caracterizaron el proceso de gasificación estudiado.

Los valores obtenidos de las diferentes eficiencias en el proceso se muestran en el cuadro 11. La primera en obtener fue la Eficiencia de Gas Frío (CGE-Cold Gas Efficiency en inglés), este valor nos indica que para astillas de madera hubo menores pérdidas de energía de la biomasa después del proceso de transformación termoquímica en el reactor y luego del proceso limpieza del gas; en otras palabras, la eficiencia del proceso de gasificación dentro del reactor es mayor al alimentar astillas con un valor de $(71,46 \pm 10,58)$ %, que, al utilizar pellets, con los cuales disminuye 5 puntos porcentuales según el valor promedio $(66,12 \pm 12,76)$ %. Este concuerda con todo lo ya discutido para el proceso de gasificación de astillas de madera: temperaturas altas y estables dentro del reactor, composiciones de hidrógeno mayores, razón equivalente cercana a la unidad y un menor flujo de alquitranes generados.

Otro parámetro importante es la eficiencia de conversión de la energía disponible en la biomasa alimentada en energía eléctrica. La Eficiencia Térmica Global indica

el desempeño general del módulo para realizar el proceso de gasificación para obtención de energía eléctrica. Fueron eficiencias pequeñas, pero son las esperadas, pues cualquier proceso de transformación de la materia incluye pérdidas de energía según las leyes de la termodinámica, sobre todo porque existieron una serie de operaciones unitarias y transformaciones termoquímicas, en el reactor y en el motor, que provocaron grandes pérdidas de energía en calor disipado y en el transporte de partículas. Se obtuvo mayor eficiencia en el aprovechamiento de la energía con los combustibles en forma de astillas, según los resultados obtenidos, pues $(15,21 \pm 0,44)$ % de la energía disponible en las astillas fue convertida en energía eléctrica y solo un $(12,36 \pm 0,29)$ % sucedió en los pellets de madera.

La tercera eficiencia dentro del proceso es la capacidad de aprovechar la energía que posee la corriente de syngas para la producción de energía eléctrica. Según el cálculo de la Eficiencia del Generador/Motor, hay una mejor conversión en esta unidad cuando se emplean astillas de madera, pero la diferencia es poca, ya que según la desviación promedio de los datos, calculada a partir de todas las desviaciones con el promedio de las variables medidas y requeridas para la obtención de estos valores, el rango en que ambas eficiencias interceden es amplio. Por lo tanto, el proceso de combustión del syngas dentro del motor para producir energía mecánica que será aprovechada por el generador (el cual posee una eficiencia de diseño del 95 %) para generar energía eléctrica es eficiente como operación unitaria.

Los rendimientos muestran la utilidad de una cosa en relación con lo que cuesta, con lo que gasta, con lo que en ello se ha invertido. En el cuadro 12 se muestran los rendimientos más importantes que caracterizan la operación del gasificador; por ejemplo, para obtener $(564 \pm 10,53)$ kWh de energía en un mes se requiere una tonelada de astillas de madera a un 16,00 % de humedad. En contraste, se requiere una tonelada de pellets para entregar 487,35 kWh en un mes también, es decir se obtiene un 13 % de más energía al emplear una tonelada de astillas de madera.

Sin embargo, hay que considerar que se debe alimentar con astillas de madera de un tamaño específico, es decir se requiere entre un (30 - 40) % más de lo estimado para que después del proceso de tamizaje del producto recién "chipeado" se obtenga la tonelada calculada, en otras palabras, se requieren entre (1,3-1,4) ton de astillas de madera para obtener la cantidad de energía mencionada. Al despreñar el contenido de humedad, menos la cantidad de combustible que es requerido para generar la misma cantidad de energía, pero se debe recordar que el combustible debe contener entre (15 - 22) % de humedad en base húmeda para que el proceso de gasificación sea eficiente. A forma de ejemplo, una residencia en promedio consume 350 kWh en un mes en la zona metropolitana, por lo tanto, se requieren 620 kg

de astillas de madera o 719 kg de pellets de madera para satisfacer esa demanda empleando una planta piloto como la empleada como fuente única de energía.

El rendimiento de syngas/biomasa es un valor que indica cuántos kilogramos se obtiene de syngas al alimentar un kilogramo de biomasa a la planta. Para las astillas de madera se obtuvo en promedio 1,75 kg de syngas por kilogramo de biomasa, 25 % más que al alimentar pellets de madera. El rendimiento de producción del flujo volumétrico de gas limpio y seco con base a flujo de biomasa húmeda que ingresa al sistema es de $(1,55 \pm 0,31) \text{ Nm}^3/\text{kg}$ para las astillas y $(1,18 \pm 0,29) \text{ Nm}^3/\text{kg}$ para los pellets de madera. Ambos rendimientos se reflejan fácilmente en los flujos de las corrientes obtenidas y los valores de las eficiencias de gas frío para las corridas con pellets de madera, ambos casos ya se discutieron anteriormente. Entonces, en general, existe un mejor desempeño de la planta al utilizar astillas de madera como combustible.

Para concluir si existe o no diferencia estadísticamente significativa entre los parámetros típicos que describen el desempeño de un proceso de gasificación de biomasa para la generación de energía eléctrica y térmica según el tipo de geometría de la biomasa alimentada, se realizaron pruebas t-Student como se aprecia en el cuadro 13. Los resultados obtenidos a partir de este análisis estadístico indica que parámetros importantes para describir el desempeño general del proceso como lo es la eficiencia térmica global, el rendimiento eléctrico y el rendimiento syngas son estadísticamente diferentes, lo cual, apoyado con lo anteriormente discutido con respecto a los valores promedio, indica que la incidencia de la geometría de la biomasa, empleada en un proceso de gasificación con un reactor “*downdraft*” o de lecho descendente, es importante para el desempeño del proceso, siendo en este caso en específico, las astillas de madera un combustible que supera a los pellets de madera en el desempeño de su transformación termoquímica para la generación de energía térmica y eléctrica.

El resultado estadístico de dos colas para los parámetros que difieren estadísticamente, por sus valores de p-value, permite deducir que la diferencia es poca, debido a la cercanía del valor de 0,025 para los p-value, sin embargo, lo suficiente para concluir que hay incidencia de la geometría de los combustibles en el desempeño del proceso en todas las unidades de la planta.

Conclusiones

Se evidenció, estadísticamente, que solo existe diferencia en el contenido de cenizas y el poder calórico entre ambos combustibles utilizados.

Los valores de las propiedades fisicoquímicas de ambos combustibles indican que ambos son aptos para ser

utilizados en el proceso de gasificación en la planta piloto según las especificaciones del fabricante.

Al comparar los promedios de los flujos de las corrientes según cada tipo de combustible alimentado, se apreció que al alimentar pellets de madera el consumo de biomasa aumentó, sin embargo, el consumo de aire y la producción de syngas disminuyeron y la cantidad de cenizas recolectadas aumentaron. Aunque el porcentaje analítico de cenizas es prácticamente igual entre las biomásas, al operar una cantidad similar de horas la planta piloto, el material que no se transformó en gas y fue removido del sistema aumentó al utilizar pellets de madera.

En una corrida con pellets, debido al atascamiento frecuente en la garganta del reactor, la estabilidad del proceso es baja, ya que de forma periódica se generó una caída de presión de magnitud apreciable entre la zona de combustión y la zona de reducción del reactor, hasta que la parrilla en la base se activa, por lo tanto, se tuvo que aumentar la frecuencia de activación de este componente, provocando un aumento en el consumo de biomasa y en la producción de cenizas, lo cual afecta también al perfil de temperatura dentro del reactor.

Las temperaturas dentro del reactor fueron menores al emplear pellets de madera. En la zona de restricción existe una disminución de 70 °C aproximadamente con respecto a las astillas, lo cual afecta directamente el desempeño de las reacciones de reducción o gasificación que son endotérmicas.

Al no alcanzar temperaturas lo suficientemente altas dentro del reactor, el contenido de H_2 en el syngas disminuyó y aumentó el contenido de CH_4 al emplear pellets de madera debido a la naturaleza endotérmica de las reacciones de producción de H_2 .

Las corrientes de proceso en general son más calientes cuando se emplearon astillas de madera como combustible, lo cual es importante para un uso térmico de intercambio del gas producto.

Parámetros importantes como lo son la eficiencia térmica global, el rendimiento eléctrico y el rendimiento de syngas fueron estadísticamente diferentes, lo cual, apoyado con los valores promedio de cada uno, indica que la incidencia de la geometría de la biomasa, empleada en un proceso de gasificación con un reactor “*downdraft*” o de lecho descendente, es importante para el desempeño del proceso, siendo en este caso en específico las astillas de madera un combustible que superó a los pellets de madera en el desempeño de la planta piloto. Por lo tanto, esta geometría posee gran capacidad para un proceso de transformación termoquímica para la generación de energía térmica y eléctrica.

Referencias

- BERC. (2011). Woodchip Heating Fuel Specifications in the Northeastern United States. Retrieved from http://www.biomasscenter.org/images/stories/Woodchip_Heating_Fuel_Specs_electronic.pdf
- Forestry&oNaturaloResourcesoDevelopment. (2014). Wood Chip for Biomass Power Generation. Retrieved January 1, 2017, from <http://www.active-energy.com/wood-chip-biomass-power-generation>
- González, G. (2012). Diseño de una planta de peletización en Castilla y León. Castilla: Universidad Carlos III Castilla.
- Jangsawang, W., Laohalidanond, K., & Kerdsuwan, S. (2015). Optimum Equivalence Ratio of Biomass Gasification Process Based on Thermodynamic Equilibrium Model. *Energy Procedia* (Vol. 79). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.528>
- Kumar, A., Jones, D. D., & Hanna, M. A. (2009). Thermochemical biomass gasification: A review of the current status of the technology. *Energies*, 2(3), 556–581. <https://doi.org/10.3390/en20300556>
- McMullen, J. . (2005). Storage and handling characteristics of pellets from poultry litter. *Appl Eng Agric.*
- Ramírez, M., & Solano, F. (2017). PLAN DE EXPANSION DE LA GENERACION ELECTRICA PERIODO 2016-2035 SUS COMENTARIOS SON BIENVENIDOS Por favor dirija sus comentarios, observaciones o consultas a Contenido. Retrieved from www.grupoice.com
- Ruiz, J. A., Juárez, M. C., Morales, M. P., Muñoz, P., & Mendivil, M. A. (2013). Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 174–183. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.021>
- Tenorio, C., Moya, R., Salas, C., & Berrocal, A. (2016). Evaluation of wood properties from six native species of forest plantations in Costa Rica Estudio de propiedades de la madera de seis especies nativas en plantaciones de Costa Rica. *Bosque*, 37(1), 71–84. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002016000100008>
- Torres, C., Molina, D., Hernández, N., & Urvina, L. (2016). Informe técnico: Evaluación de desempeño de la tecnología comercial de gasificación utilizando residuos de café. San José.

Este artículo debe citarse como:

Torres, C; Chavez, M; Urvina, L; Moya, R. (2018). Evaluación de la incidencia de pellets y astillas de madera en el desempeño de un gasificador tipo “downdraft”. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 15 (Supl. 01): 25-36. doi. 10.18845/rfmk.v15i1.3847