

Evaluación del potencial energético de la madera residual urbana mediante gasificación¹

Evaluation of the energetic potential of urban wood waste through gasification

Lili Vega²
Andrés Herrera³

¹Convenio Interadministrativo 001 - 899 suscrito entre la UAESP y el JBB, fecha de inicio julio 1 de 2015, fecha de finalización 31 de diciembre de 2016.

²Colombiana. Candidata a MSc. Ingeniería Mecánica. Contratista. Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, Colombia. E-mail: ltvegac@unal.edu.co

³Colombiano. Candidato a MSc. Cuencas Hidrográficas. Contratista. Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos UAESP, Bogotá, Colombia. E-mail: anheag@gmail.com

Recibido: 24- 07 - 2017 Aceptado: 03-05-2018

Resumen

Se evaluó el potencial energético de la madera residual urbana (MRU) del Distrito Capital, proveniente de mobiliario, carretas, guacales y estibas, mediante el proceso de gasificación en la generación de energía eléctrica empleando el sistema Power Pallet® del Jardín Botánico de Bogotá. La MRU se clasificó en dos categorías provenientes de un tablero de fibra de densidad media o aglomerado de madera (MDF- por sus siglas en inglés) y sin aglomerado, analizando las características fisicoquímicas de los dos tipos de biomasa, el desempeño del sistema, las variables operacionales como temperatura, potencia, biomasa consumida, desempeño energético, y se realizó un análisis económico de la producción de energía eléctrica mediante el aprovechamiento de este tipo de residuo. De acuerdo con la evaluación técnica, se concluye que la tecnología Power Pallet® no es la más adecuada para el aprovechamiento de la MRU, debido a las restricciones del tamaño de partícula y a la limpieza del gas de síntesis. De acuerdo con la cantidad estimada promedio anual de madera residual urbana de 144.667 toneladas, la potencia máxima que podría instalar el Distrito sería alrededor de los 20 kW eléctricos. Aunque este potencial es bajo comparado con otros tipos de biomasa, es una alternativa que permitirá la valorización y reutilización de la MRU.

Palabras clave: Residuos sólidos urbanos; energías renovables; seguridad energética, aglomerado de madera; valoración energética de residuos.

Abstract

This article evaluates the energetic potential of the urban residual wood (MRU for its initials in Spanish) of the Capital District, that comes from furniture, wagons, wooden crates and stowages, through the process of gasification in the generation of electric energy using the Power Pallet® system of the Botanical Garden of Bogota. Therefore, the MRU was classified into two categories with wood agglomerate MDF and without agglomerate, analyzing the physical-chemical characteristics of the two types of biomass, the system performance, operational variables such as temperature, power, etc. An economic analysis of the Production of electric energy was made by the use of this type of waste. According to the technical evaluation it is concluded that the power pallet technology is not the most suitable for the exploitation of MRU, due to the restrictions of the particle size and the synthesis gas cleaning. According to the estimated amount of annual urban residual wood of 144,667 tons for the city, the maximum power that the District could install will be around 20 kW. Although this potential is low compared to other types of biomass, it is an alternative that allows the recovery and reuse of the MRU.

Keywords: Urban solid waste; renewable energy; energetic security; wood agglomerate; waste energy assessment.

Cómo citar: Vega, L., y Herrera, A. (2018). Evaluación del potencial energético de la madera residual urbana mediante gasificación. *Informador Técnico* 82(1), 26-40. doi: <http://doi.org/10.23850/22565035.888>

Introducción

Todo material en estado sólido, líquido o gaseoso, ya sea aislado o mezclado con otros, resultante de un proceso de extracción de la Naturaleza, transformación, fabricación o consumo humano, que su poseedor decide abandonar es considerado como un residuo (Jaramillo y Zapata, 2008). Aquellos residuos que se generan en los espacios urbanizados, como consecuencia de las actividades de consumo y gestión de actividades domésticas (viviendas), servicios (hostelería, hospitales, oficinas, mercados, entre otros.) y algunas industrias se clasifican como Residuos Sólidos Urbanos (RSU) (Jaramillo y Zapata, 2008). Los RSU contienen una fracción significativa de papel, desechos alimenticios, madera y recortes de poda, algodón y cuero, metales y vidrios, como también derivados del petróleo como plásticos, gomas y telas sintéticas (Moratorio, Rocco, y Castelli, 2012).

En Colombia se producen alrededor de 25.000 toneladas de residuos sólidos al día, de los que se recuperan y reintegran en el ciclo productivo el 13%, siendo recuperados y comercializados un 7% (Fernández, Martínez, y López, 2015). A nivel nacional la disposición final se realiza en sitios autorizados como las celdas de contingencia, las plantas de aprovechamiento y los rellenos sanitarios; y sitios no autorizados por las autoridades ambientales como las celdas transitorias, la quema, los botaderos y los cuerpos de agua (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2015).

De acuerdo con el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, el Distrito Capital produce aproximadamente 6.429 toneladas de residuos sólidos diariamente, lo que se traduce en 2.346.826 toneladas anuales, de las cuales un 60% son de carácter aprovechable, es decir con potencial de reciclaje, reúso y otros tipos de utilidad (Fernández *et al.*, 2015). De estos residuos el 27% corresponde a alimentos, seguido por los residuos de plástico y papel con un 19,15%, y el 0,49% corresponde a madera (UAESP, 2011).

Bajo el marco del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS), se plantean múltiples alternativas para el manejo de los RSU, desde la separación en la fuente (orgánico, reciclaje e inservible), la transformación (compostaje, valorización energética de residuos) y la disposición final. El Programa de Aprovechamiento, desarrollado en el PGIRS plantea la cuantificación y caracterización de los residuos para determinar el potencial de aprovechamiento (Ministro de Vivienda Ciudad y Territorio, 2015). Siguiendo esta directriz, para el caso de la madera residual se reporta en el mercado actual alternativas como la fabricación de tablero aglomerado, mediante la separación, transporte y limpieza de la madera a costos eficientes de producción (Primadera S.A.S, 2017), fabricación de pellets para combustión en estufas, calderas, entre otros. (Aruna, Laarman, Araman, Coulter, y Cubbage, 1997), suelos de madera, elementos de carpintería para proyectos de restauración (Bratkovich, Bowyer, Lindburg, y Fernholz, 2009), entre otros.

El Jardín Botánico de Bogotá (JBB) y la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP) bajo el Convenio interadministrativo 889-JBB-001-UAESP suscrito en el año 2015, aunaron esfuerzos con el fin de establecer la viabilidad técnica de la gasificación de madera residual urbana (MRU) para la producción de energía eléctrica, como una opción para la transformación de este tipo de residuos. Aunque esta opción no es la solución definitiva, se articulan sus esfuerzos para la recuperación de los RSU proporcionando beneficios adicionales como la reducción de impactos ambientales de la producción de nuevos productos, la reutilización, la creación de empleo, y, en muchos casos, la reducción de costes existentes, evitando los costes de compra / eliminación. Potenciando la posibilidad de cerrar los ciclos de vida de los RSU y de generar un valor agregado, que se ve reflejado en la producción de energía eléctrica.

La gasificación, es un proceso termoquímico en el que se dan un conjunto de reacciones químicas en un ambiente pobre en oxígeno, dando como resultado la transformación de un sólido en una serie de gases que pueden ser empleados en la combustión. En este proceso la celulosa se transforma en hidrocarburos más ligeros, en monóxido de carbono e hidrógeno. El rendimiento del proceso de gasificación varía dependiendo de la tecnología, el combustible y el agente gasificante que se utilice, en el rango de 70-80%. Mediante gasificación se pueden alcanzar rendimientos eléctricos de hasta un 30-32% mediante el uso de moto-generadores accionados por *syngas* (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía IDAE, 2007). El proceso se da en 3 etapas: una de calentamiento hasta 100 °C, que permite el secado de la biomasa por evaporación del agua contenida en la misma. Una etapa llamada pirólisis, en la que se rompen las moléculas grandes dando lugar a otras moléculas de cadena más corta, que a la temperatura del reactor, están en fase gaseosa.

Y, finalmente, una etapa de oxidación de la fracción más pesada (carbonosa) de la biomasa al entrar en contacto con el agente gasificante (aire, oxígeno, o vapor de agua) (IDAE, 2007; Pujoldevall Sánchez de Toledo, 2015). De acuerdo con el método de contacto que emplean entre las fases sólida (biomasa) y gaseosa (agente oxidante), los gasificadores se clasifican en Gasificadores de lecho fijo, lecho fluidizado y de arrastre. De acuerdo con la línea de bioenergía, un tamaño entre 1 - 1,5 MW es práctico para los gasificadores de corriente descendente y cuando se trata de corriente ascendente hay plantas de un tamaño de 4 - 6 MWt (Held, 2012).

Materiales y métodos

La evaluación del potencial energético se realizó mediante la preparación, caracterización fisicoquímica y la generación de energía eléctrica mediante la gasificación de la MRU. El proceso de gasificación y generación de energía eléctrica se llevó a cabo en el sistema Power Pallet® PP20, ubicado en el Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis. A continuación, se detallan los materiales, equipos y métodos empleados.

Sistema Power Pallet® PP20

El sistema está compuesto por un reactor serie GEK TOTTI, un sistema de automatización y un motor acoplado a un generador (Figura 1).

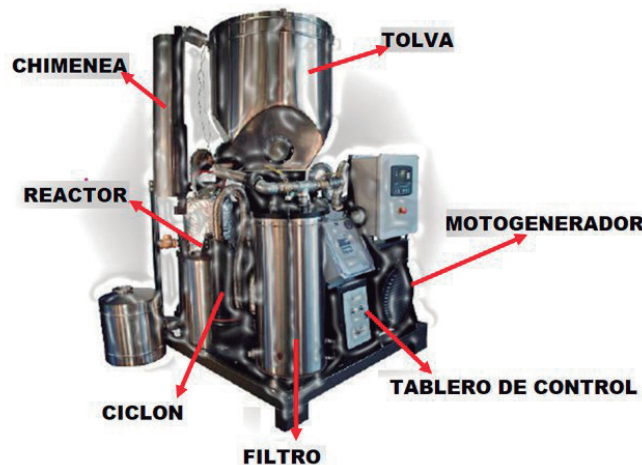


Figura 1. Componentes del Sistema Power Pallet® PP20.

Fuente: adaptado de (All Power Labs, 2014)

El sistema se puede dividir en dos componentes: el de transformación termoquímica, con aire como agente gasificante y el de generación de energía eléctrica mediante un motor a gas. Con una potencia nominal continua de 15 kW a 50 Hz y 18 kW a 60 Hz, un consumo nominal de 1,2 kg/kWh. De acuerdo con el manual de operación, la biomasa empleada debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Tamaño de partícula entre $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{8}$ ".
- Contenido de carbono fijo alrededor de 20% o más en peso.
- Contenido de cenizas menor al 5%.
- Contenido de humedad entre el 10% -30%, medido sobre una base de masa seca.
- Temperatura de restricción (en el hogar) entre 800°–1000°C.
- Temperatura de reducción (en la parte superior de la canasta) entre 700°–800°C.

Preparación y clasificación granulométrica de la madera residual urbana - MRU

La madera procedente de los residuos de poda empleados en el Jardín Botánico proviene de una mezcla no determinada de especies presentes en la ciudad de Bogotá, entre las cuales se han logrado identificar: el Pino (*Pinus*), Eucalipto (*Eucalyptus*), Cerezo (*Prunus serótina*), Urapa (*Cytharexylon subflavescens*), Guayacán (*Lafoensia acuminata*), Sauce (*Salix ps.*), Acacia morada (*Acacia baileyana*), Caucho (*Ficus soatensis*), Cedro (*Cedrela montana*) (OpEPA, 2016; García, 1968).

La MRU proveniente de mobiliario urbano, carretas, estibas y guacales fue proporcionada por la UAESP. Se emplearon tanto maderas naturales obtenidas directamente de los troncos de los árboles y maderas artificiales obtenidas a partir de restos de madera natural (cortezas, virutas, ramas, etc.) como tableros de aglomerado, tableros de contrachapado y tableros de fibras. Para las pruebas de gasificación se realizó la siguiente clasificación de la MRU (Figura 2).

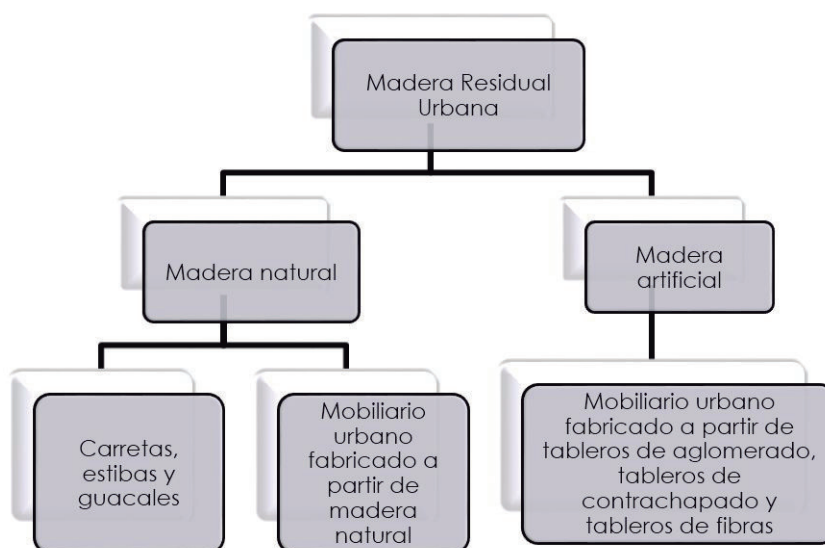


Figura 2. Clasificación de la MRU para realización de pruebas físico-químicas

Fuente: Los autores.

La preparación de los residuos de poda del Jardín se realizó de acuerdo con el protocolo de operación, como se muestra en la Figura 3. La preparación de la MRU se inició con el retiro de todas las puntillas, tornillos y plásticos, para realizar la reducción y la clasificación granulométrica según a las especificaciones del sistema.

Caracterización fisicoquímica



Figura 3. Acondicionamiento de la biomasa para proceso de gasificación

Fuente: Los autores.

Se llevaron a cabo las siguientes pruebas de acuerdo con estándares internacionales:

- Método estándar para el análisis de contenido de Humedad: Norma ASTM E871.
- Método de prueba estándar para la determinación del contenido de cenizas: Norma ASTM D 3174.
- Método para medir el pH de astillas de madera, basado en la norma T-435 om-02.
- Análisis elemental: ASTM D5373, ASTM D4239.
- Análisis próximo: ASTM E872-72, ASTM E870-82, ASTM D2016-74, ASTM D102-84.
- Poder Calorífico: ASTM D240.
- Análisis termogravimétrico TGA, ASTM E1131.
- Cromatografía de gases o análisis de composición de gases: ASTM E1131.

La caracterización fisicoquímica como el análisis próximo y último se llevó a cabo para las 4 muestras de MRU y para los residuos del JBB. En el caso de la composición del gas de síntesis y del poder calorífico del mismo se realizaron para la gasificación de MRU con y sin MDF, y los residuos del JBB.

Pruebas de generación de energía

Una vez preparadas las dos muestras de MRU, se procedió a realizar las pruebas de generación de energía eléctrica mediante gasificación en el sistema Power Pallet® PP20, de acuerdo con el Protocolo de Operación (All Power Labs, 2014). Se llevaron a cabo tres pruebas con su respectiva réplica, realizando el registro de las siguientes variables como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Operacionalización de variables

Variables Independientes (Factores)	Indicadores/ dimensiones características	Técnicas e instrumentos de medición
Tipo de biomasa	Procedencia MRU con y sin MDF, Residuos de poda	Observación visual
Contenido de humedad	% en peso	Norma ASTM E871
Porcentaje de aprovechamiento	% en peso	kg biomasa apta/kg biomasa total
Cantidad de biomasa consumida	kg de MRU	Balanza digital
Variables dependientes (Respuestas)		
Temperatura de restricción (Trst)	800°–1000°C	Sistema Power Pallet®, termocupla tipo k
Temperatura de reducción (Tred)	700°–800°C	Sistema Power Pallet®, termocupla tipo k
Potencia generada	0-18 kW	Sistema Power Pallet®
Energía eléctrica producida	kWh	Contador de electricidad

Fuente: Los autores.

Evaluación del potencial energético de la MRU

La evaluación del potencial energético de la MRU, se realizó mediante la comparación de la línea base del sistema empleando residuos de poda, la cual se realizó con base en el porcentaje de aprovechamiento de la biomasa debido a la clasificación granulométrica, el consumo de biomasa por hora de operación, la rampa de calentamiento, la potencia generada. Adicionalmente, se determinó el potencial energético de la MRU de la ciudad de Bogotá.

Resultados y discusión

Porcentaje de aprovechamiento

De acuerdo con la reducción y clasificación granulométrica, se determinó el porcentaje de aprovechamiento de la MRU, el cual se muestra en la Tabla 2. Se observa que 39,1 kg (60%) y 46,4 kg (47%) de la biomasa se queda en la primera clasificación granulométrica ($>1/2''$), para la MRU-natural y MRU-artificial respectivamente, valores muy por encima al presentado para los residuos de poda con un 20%. Lo anterior se ve representado en un bajo porcentaje de aprovechamiento para las muestras de MRU, con 24% y 25%.

Tabla 2. Determinación del porcentaje de aprovechamiento de la MRU y la línea base (Residuos de poda)

Clasificación granulométrica/ Tipo de biomasa	Residuos de poda: Línea base	MRU-natural	MRU-artificial
Peso inicial de biomasa (kg)	42,5	39,1	46,4
Cantidad de biomasa $>1/2''$ (kg)	8,6	23,3	22
Cantidad de biomasa $<1/2''$ (kg)	34,2	15,8	24,4
Cantidad de biomasa $>3/8''$ (kg)	20,4	9,6	11,8
Cantidad de biomasa $<3/8''$ (kg)	13,8	6,3	12,6
% Aprovechamiento	48%	24%	25%

Fuente: Los autores.

Caracterización fisicoquímica

Al determinar la composición de la MRU (ver Tabla 3) y de la mezcla del JBB se observó que son ricos en oxígeno y carbono. Importante, resaltar que el contenido de azufre es cero para todas las biomásas, lo que nos permite afirmar que no habrá formación de óxidos de azufre (SOx) causantes de la corrosión, lluvia ácida y sulfatos transportados en material particulado respirable (IDAE y ESCAN, 2008). La MRU presenta una alta proporción de oxígeno de 49% y 45% en carbono, lo cual puede ser causante de la reducción del Poder Calorífico Inferior - PCI, debido a la baja energía química contenida en los enlaces tipo carbono-oxígeno y carbono-hidrógeno. La presencia de nitrógeno en la muestra de MRU con MDF, aunque baja puede contribuir a la formación de Óxidos de Nitrógeno (NOx) que favorecen la formación de la lluvia ácida.

Tabla 3. Análisis elemental

Muestra	Nitrógeno	Carbono	Hidrogeno	Azufre	Oxígeno*
Mobiliario	0,00	47,1539	5,7270	0,00	47,1191
Carretas	0,00	45,4835	5,5772	0,00	48,9393
Estibas	0,00	45,1833	5,6876	0,00	49,1292
JBB	0,00	43,6711	5,0551	0,00	51,2738
MRU- con MDF	1,2324	43,7743	5,3036	0,00	49,6897

*Los valores son calculados

Fuente: Los autores.

En la Tabla 4, se puede observar el resultado del análisis próximo. El contenido de humedad menor al 10% está de acuerdo con los requerimientos establecidos por el fabricante del equipo de gasificación. Este bajo contenido de humedad se verá reflejado en una etapa de secado más corta. El contenido de cenizas incide en la energía disponible de la biomasa y a su vez afecta los costos de procesamiento y transformación de la energía de la misma (IDAE y ESCAN, 2008). Un porcentaje menor al 5%, es favorable, por lo anteriormente expuesto y no habrá formación de escoria (Bratkovich *et al.*, 2009). En cuanto al porcentaje de materia volátil (80%) y carbono fijo (19%), este será beneficioso para la gasificación si se presentan valores altos ya que se ve reflejado en una alta energía calórica contenida en el gas de síntesis, representando la facilidad con la cual la biomasa puede ser quemada, gasificada u oxidada (IDAE, 2007). El contenido de materia volátil fue mayor al 10% recomendado, por lo tanto, para este tipo de biomasa es más aconsejable emplearla en gasificadores de lecho móvil en corriente paralela (Rocha, Vesga, y Pinto, 2011; Fonseca González, 2003).

Tabla 4. Análisis próximo de las biomosas

Muestra	Humedad % (m/m)	Materia volátil % (base seca)	Carbono fijo % (m/m) (base seca)	Cenizas % (m/m) (base seca)	pH
Mobiliario	7,623	79,924	19,746	0,330	4,48
Carretas	8,174	82,163	17,728	0,109	4,36
Estibas	8,943	82,371	17,143	0,486	4,47
JBB	9,050	75,072	20,422	4,506	6,21
MRU- con MDF	7,617	78,911	20,041	1,048	4,36

Fuente: Los autores.

El pH resultó moderadamente ácido para todas las muestras evaluadas, lo que puede afectar su utilización, debido a que en contacto con metales puede corroer (IDAE, 2007).

El poder calorífico de la MRU evaluada resultó alrededor de 17225 kJ/kg y 18430 kJ/kg, como se muestra en la Tabla 5, valores que corresponden a la MRU con MDF y a la madera proveniente de Mobiliario, respectivamente.

Tabla 5. Poder Calorífico de las diferentes muestras

Muestra	Poder calorífico superior (kJ/kg)
Mobiliario	18430
Carretas	17500
Estibas	17565
JBB	16065
MRU- con MDF	17225

Fuente: Los autores.

Los valores obtenidos son cercanos a las biomosas empleadas para gasificación como el bagazo de caña húmedo y cascotes de la almendra, como se muestra en la Figura 4.

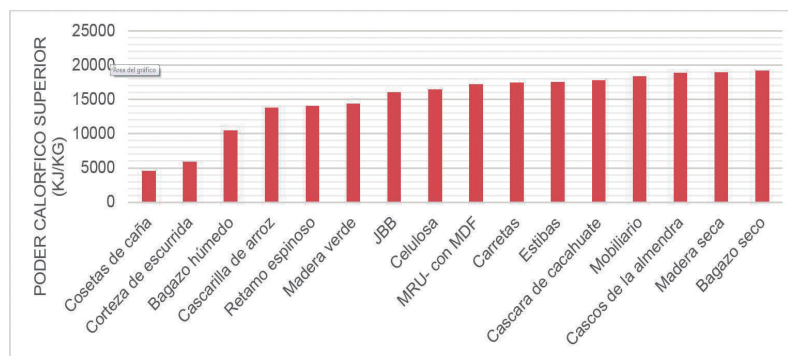


Figura 4. Poder calorífico superior de diferentes biomosas y las estudiadas.

Fuente: Adaptado de Serrato y Lesmes (2016).

A partir de las curvas de pérdida de peso (TGA) y de las correspondientes a su derivada respecto al tiempo (DTG) se determinó el rango de temperaturas en la cual la pérdida de masa fue máxima.

En la curva TGA para la muestra de Mobiliario (Figura 5) se observa que la temperatura de degradación térmica se ubica entre 230°C y 390°C. La curva DTG muestra que la resistencia a la oxidación es decreciente entre 230°C y 400°C, donde tiene lugar la mayor pérdida de peso con un porcentaje de 64,12%.

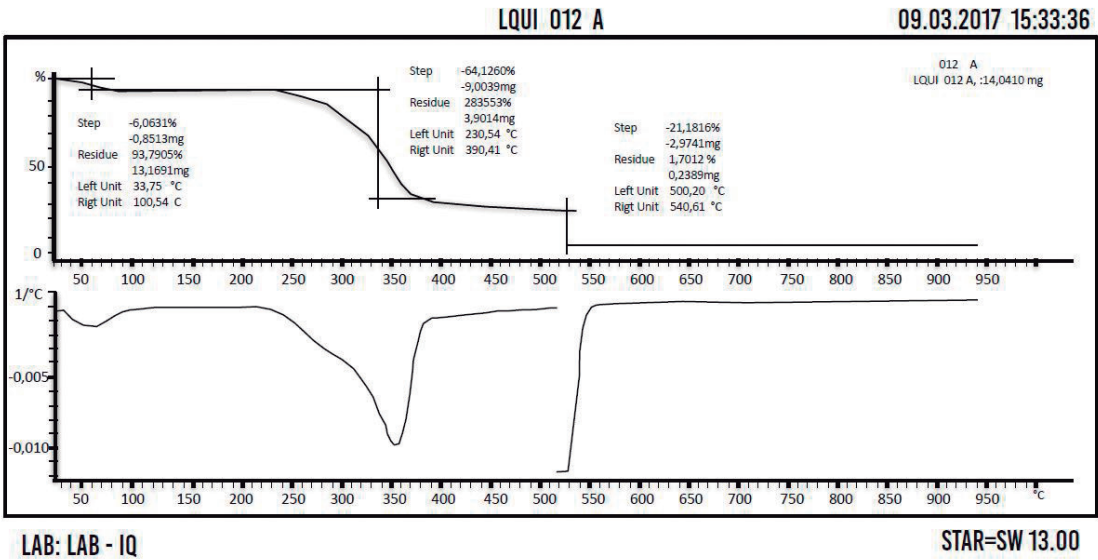


Figura 5. Curva TGA y DTG para la muestra de mobiliario
Fuente: Los autores

Para la muestra de la MRU proveniente de carretas, la curva TGA (Figura 6) se puede observar que la temperatura de degradación térmica se ubica entre 230°C y 390°C, esta curva es muy similar a la obtenida en la muestra de mobiliario. Este rango de temperatura presenta la mayor pérdida de peso con un porcentaje de 68,1%.

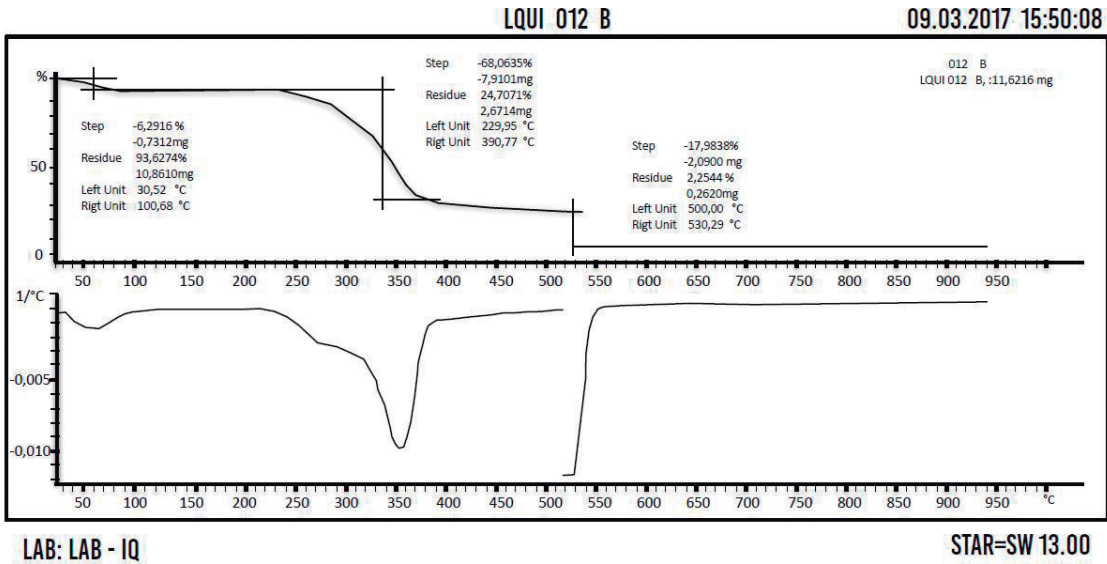


Figura 6. Curva TGA y DTG para la muestra de carretas
Fuente: Los autores

En la curva TGA para la muestra de Estibas (Figura 7) se observa que la temperatura de degradación térmica se ubica entre 230°C y 390°C. La pérdida de peso comienza alrededor de 230°C y finaliza luego de superar los 350°C, muy similar a las anteriores muestras. Este rango de temperatura presenta la mayor pérdida de peso con un porcentaje de 68,1%.

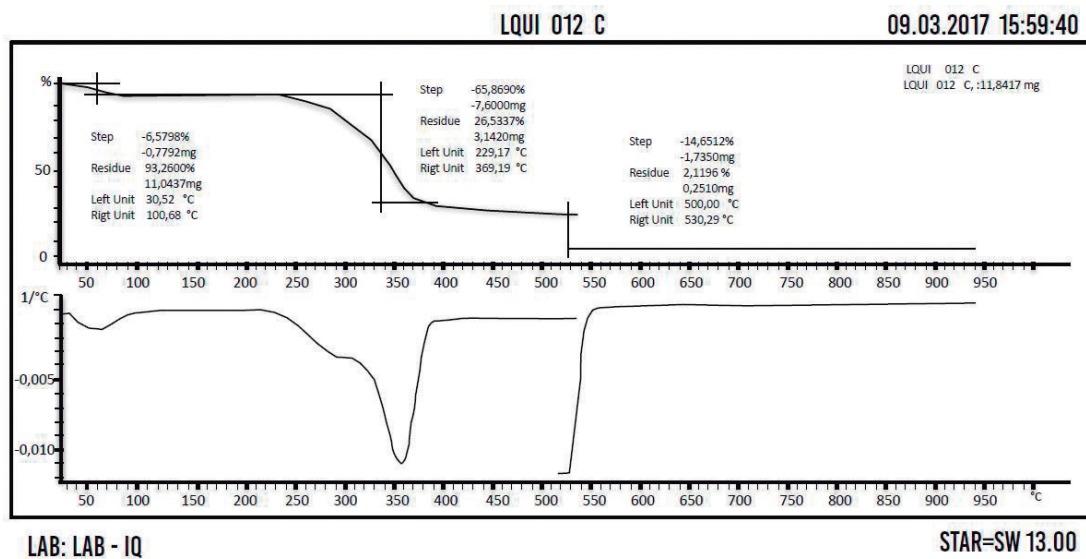


Figura 7. Curva TGA y DTG para la muestra de Estibas
Fuente: Los autores

Para la muestra de la mezcla de maderas del JBB, la curva TGA (Figura 8) se puede observar que la temperatura de degradación térmica se ubica entre 210°C y 390°C, esta curva es muy similar a la obtenida en las muestras anteriores debido al origen de todas las biomásas madera. Este rango de temperatura presenta la mayor pérdida de peso con un porcentaje de 61,87%.

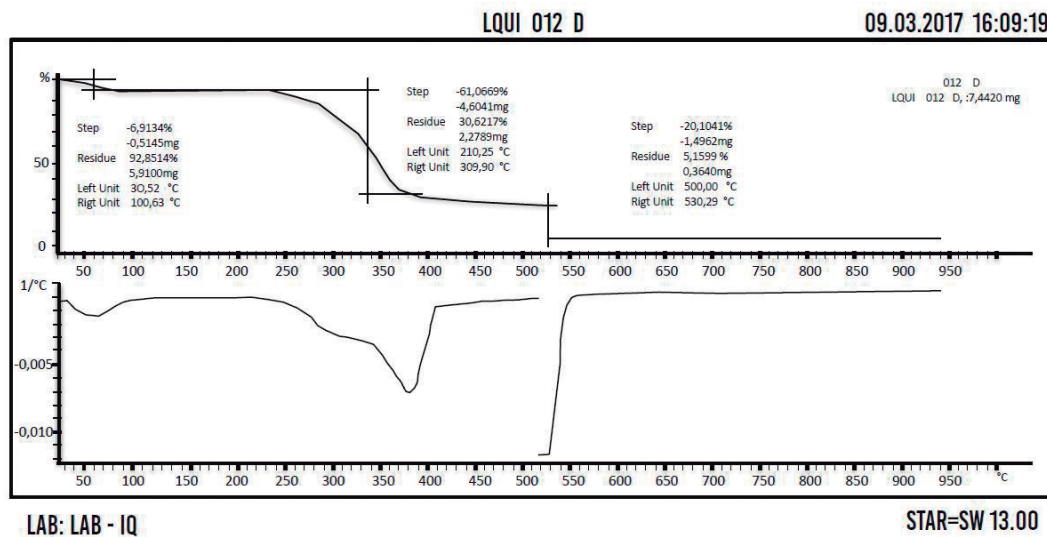


Figura 8. Curva TGA y DTG para la muestra de JBB
Fuente: Los autores

En la curva TGA para la muestra de Estibas (Figura 9) se observa que la temperatura de degradación térmica se ubica entre 234°C y 390°C, muy similar a las anteriores muestras. Este rango de temperatura presenta la mayor pérdida de peso con un porcentaje de 62%.

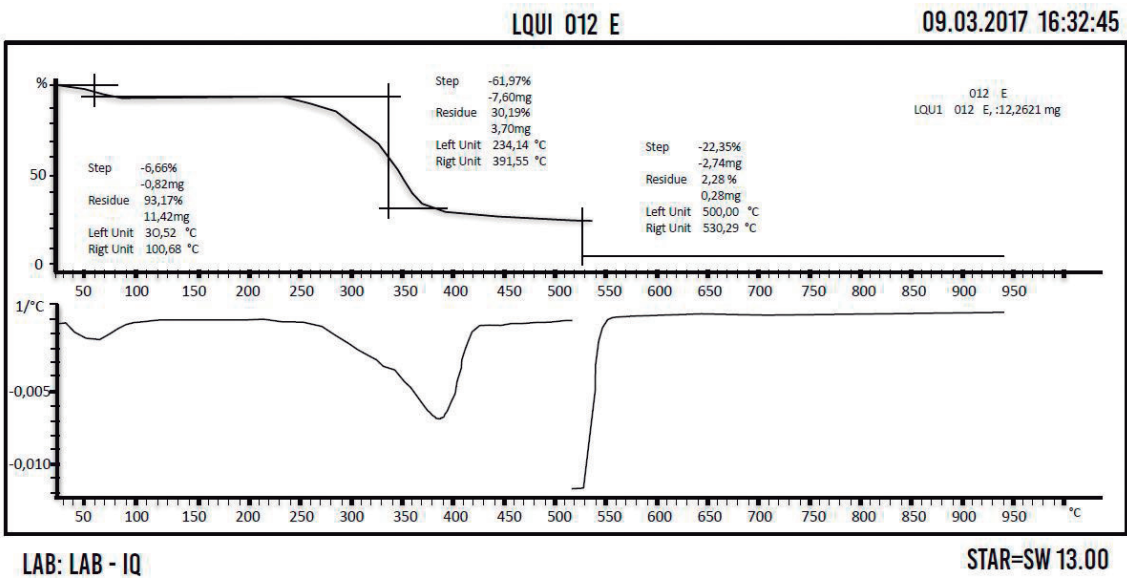


Figura 9. Curva TGA y DTG para la muestra de MRU con MDF
Fuente: Los autores

En la Figura 10 podemos observar la variación de la concentración del gas de síntesis durante el periodo de calentamiento del sistema (tomas 1 y 2) y durante la generación de energía eléctrica (tomas 3 y 4).

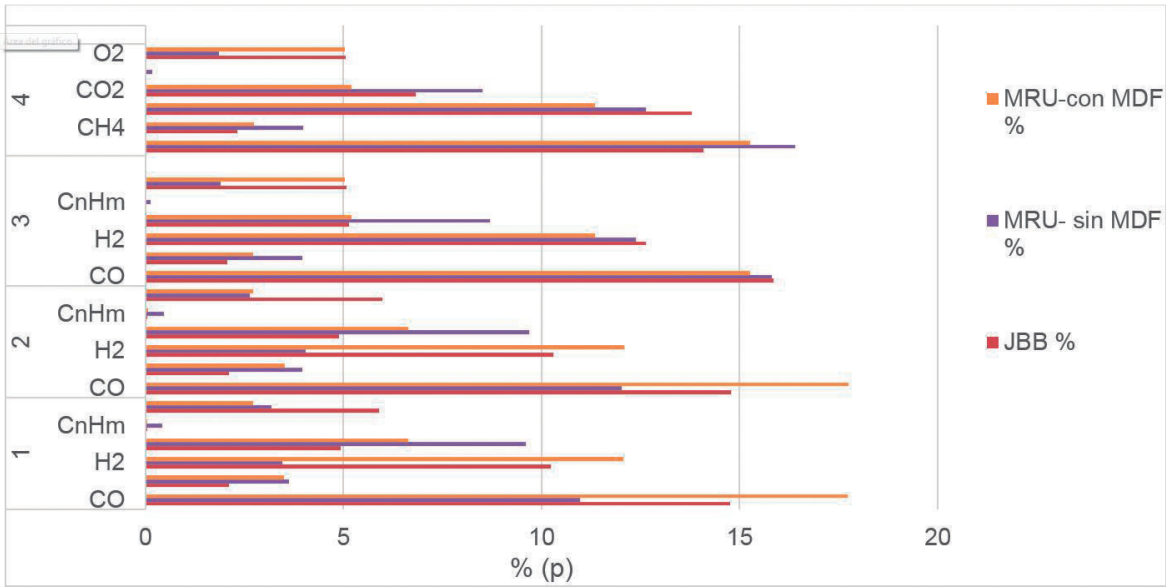


Figura 10. Variación de la concentración del gas de síntesis
Fuente: Los autores

La generación de metano fue similar para los tres tipos de biomasa, alrededor del 3%, siendo mayor para la MRU sin MDF con un promedio de 3,88%. La composición de H_2 está alrededor del 9,8%, siendo mayor para la muestra del JBB. Para el CO la composición fue alrededor del 15%, siendo mayor para la MRU con MDF con 16,5% y de CO_2 para MRU sin MDF con un 9%.

El Poder Calorífico Inferior (PCI) del gas de síntesis muestra valores inferiores al de la biomasa empleada en la generación del gas de síntesis, lo que concuerda con lo reportado por la literatura. El PCI menor obtenido fue para la mezcla del JBB, 936,5 kcal/m³, seguida por la MRU- sin MDF fue de 1003,75 kcal/m³, y con un mayor PCI la MRU-con MDF, 1069,5 kcal/m³.

Rampa de calentamiento

En la Figura 11 se observa que con respecto a línea base establecida, la MRU-natural superó la temperatura de restricción teniendo un pico de 895°C y la temperatura de reducción con un pico 584°C. Por otra parte, la MRU-artificial estuvo en el proceso de calentamiento por encima de las temperaturas de la línea base y luego se mantuvo por debajo de la misma. Adicionalmente se observa que, debido a la presencia de aditivos como resinas sintéticas, agua y parafinas no permitieron que esta alcanzara temperaturas superiores a los 800°C.

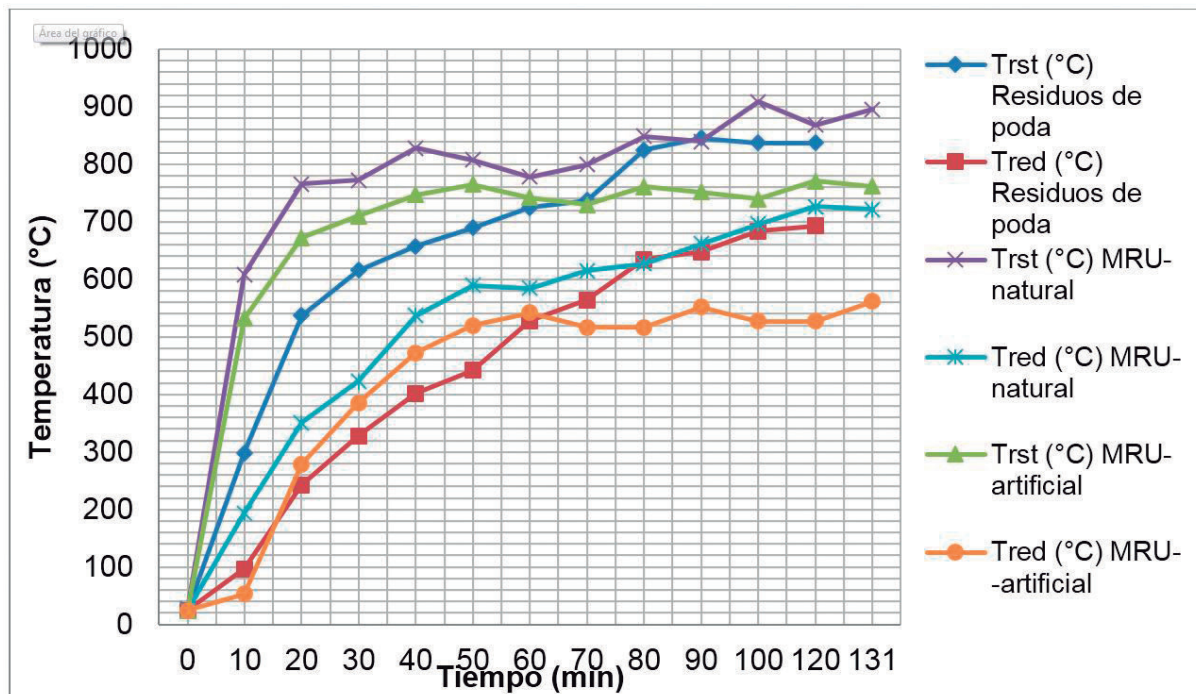


Figura 11. Línea base de operacional de residuos de poda y la curva de operación Madera residual urbana (MRU) natural y artificial. Donde Tred corresponde a la Temperatura de la zona reducción y Trst a la temperatura de la zona del hogar.

Fuente: Los autores

Potencia generada

A continuación, se muestra el promedio de potencia generada en las pruebas con MRU-natural y los residuos de poda (ver Figura 11). En las pruebas con MRU-natural, la biomasa se compactó en la tolva formando una burbuja de aire, lo que provocó que la alimentación de biomasa se afectara. Se activó alarma por sobrepasar la temperatura máxima (1055°C), lo cual provocó el apagado de emergencia del equipo. En las pruebas de MRU-artificial no se pudo generar energía eléctrica debido a que durante las pruebas se produjo mucho alquitrán, y el filtro se saturó en menos de 30 minutos, por lo que los gobernadores se ensuciaron y no funcionaron adecuadamente.

Biomasa consumida por kWh generado

Se determinó el consumo de biomasa por kWh generado, como se muestra en la Tabla 6, siendo el consumo mayor por los residuos de poda con 0,33 kg/kWh y para el MRU-natural de 0,12 kg/kWh, valores que se encuentran por debajo de los 1,2 kg/kWh establecidos por el fabricante.

Tabla 6. Consumo de biomasa por kWh generado

Tipo de biomasa	Biomasa consumida (kg)	Energía producida (kWh)	Kg/kWh
MRU-natural	29,84	244	0,12
MRU-artificial	34,95	-	-
Residuos de poda	63,54	193	0,33

Fuente. Los autores

Desempeño energético

El desempeño energético global del sistema de generación resultó mayor para la MRU-natural con un 60%, con respecto a un 56% con los residuos de poda (Figura 12).

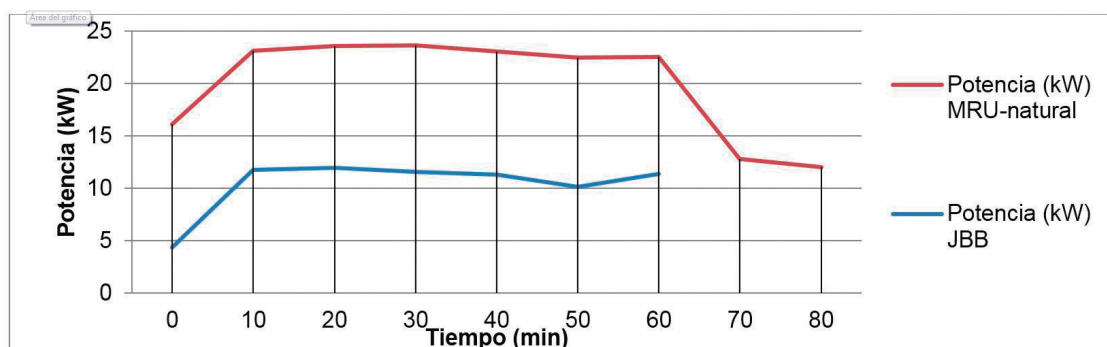


Figura 12. Promedio de potencia generada

Fuente. Los autores

Aspectos económicos

Adicionalmente se determinó el costo de generación del kWh con los residuos de poda y la MRU, en la Tabla 7 se muestran los costos de generación empleando diferentes combustibles. De acuerdo con lo establecido por el fabricante observamos que los costos de generación determinados para los residuos de poda y la MRU se encuentran dentro del rango establecido.

Tabla 7. Comparación de precios de generación

Combustible	Costo de generación (USD\$)
Diésel*	\$0,35 - \$0,70/kWh
Gasolina*	\$0,50 - \$1,00/kWh
Biomasa*	\$0,10 - \$0,30/kWh
MRU	\$0,10 - \$0,20/kWh
Residuos de poda	\$0,10 - \$0,20/kWh

Fuente: Adaptado de (All Power Labs, 2014)

Potencial energético de la MRU de la ciudad de Bogotá

Según un estudio de la UAESP, para el año 2016 la ciudad de acuerdo con los operadores de aseo en promedio el 6% (138.100 t/año = 378 t/día) de los residuos sólidos urbanos corresponde a la madera. Con el fin de tener un estimado de la cantidad de madera residual urbana disponible para el proceso de gasificación, se identificó un estimado de producción per cápita de 0,8 kg/día para el año 2013, lo que equivale a 0,29 t/año, y teniendo en cuenta crecimiento poblacional para el Distrito de Bogotá hasta el 2027 (alcaldía Mayor de Bogotá, 2014), se determinó el volumen de residuos. Con un poder calorífico promedio de 19000 kJ/kg (Viloria, 2013) para madera seca, teniendo en cuenta que la central tendrá un régimen de funcionamiento de 8.000 horas/año y el rendimiento entre la energía química contenida en la biomasa y la energía eléctrica obtenida en este tipo de centrales suele ser del 25% (Toval, 2014), y que el porcentaje de desperdicio de biomasa del 20%, tenemos que la Energía/año disponible se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Determinación de la energía disponible por año de acuerdo con el crecimiento poblacional

Año	Población	% incremento	Ton RSU/año	Ton MRU/año	MJ	Energía disponible por año (MWh)	Potencia (kW)
2013	7.674.971	1,36%	2.225.741	133.544	570.903	1,59E+02	19,82
2014	7.777.815	1,34%	2.255.566	135.334	578.553	1,61E+02	20,09
2015	7.879.705	1,31%	2.285.114	137.107	586.132	1,63E+02	20,35
2016	7.980.565	1,28%	2.314.364	138.862	593.634	1,65E+02	20,61
2017	8.081.120	1,26%	2.343.525	140.611	601.114	1,67E+02	20,87
2018	8.181.326	1,24%	2.372.584	142.355	608.568	1,69E+02	21,13
2019	8.281.138	1,22%	2.401.530	144.092	615.992	1,71E+02	21,39
2020	8.380.512	1,20%	2.430.348	145.821	623.384	1,73E+02	21,65
2021	8.409.005	0,34%	2.438.612	146.317	625.504	1,74E+02	21,72
2022	8.488.891	0,95%	2.461.778	147.707	631.446	1,75E+02	21,93
2023	8.566.989	0,92%	2.484.427	149.066	637.255	1,77E+02	22,13
2024	8.643.235	0,89%	2.506.538	150.392	642.927	1,79E+02	22,32
2025	8.717.567	0,86%	2.528.094	151.686	648.456	1,80E+02	22,52
2026	8.789.922	0,83%	2.549.078	152.945	653.838	1,82E+02	22,70
2027	8.860.242	0,80%	2.569.470	154.168	659.069	1,83E+02	22,88

Fuente: Los autores

Conclusiones

La caracterización fisicoquímica de la MRU proveniente de madera natural y artificial permite concluir que:

- Al presentar un contenido de humedad menor al 10% existe un riesgo de alcanzar temperaturas excesivamente altas en la chimenea beneficiando la formación de escorias y la fusión de la ceniza, un contenido de cenizas menor al 5%, es favorable ya que no tendrá formación de escoria.
- Un pH moderadamente ácido puede afectar su utilización, debido a que en contacto con metales puede corroer.
- Con un porcentaje de aprovechamiento tan bajo, alrededor de 25%, se recomienda evaluar otra tecnología que permita una mayor flexibilidad en cuanto al tamaño de partícula.
- El contenido de materia volátil fue mayor al 10% recomendado, por lo tanto, para este tipo de biomasa es más aconsejable emplearla en gasificadores de lecho móvil en corriente paralela.
- La presencia de nitrógeno en la muestra de MRU con MDF, (madera artificial) aunque baja puede contribuir a la formación de óxidos de nitrógeno (NOx) que favorecen la formación de la lluvia ácida.

Por otra parte, en la generación de energía se observó que la MRU- natural muestra una rampa de calentamiento más rápida que la presentada por los residuos de poda y la MRU-artificial, lo cual se debe al bajo contenido de ceniza y se verá reflejado en una mayor temperatura de operación, y una mayor calidad de gas.

El consumo de biomasa por kWh generado fue de 0,33 kg/kWh, lo que muestra que la MRU se descompone más fácilmente que los residuos de poda, con un valor de 0,12 kg/kWh.

La potencia generada estuvo alrededor de los 12 kW, valor muy cercano al generado por los residuos de poda, llegando a un pico de 12,8 kW. La MRU artificial presenta una alta generación de alquitranes, lo que puede ser propiciado por las temperaturas en la zona de restricción produciendo una conversión parcial de los alquitranes y aumentando la concentración de alquitranes pesados. En consecuencia, se produjo la saturación rápida del medio filtrante y por lo tanto la afectación al funcionamiento del gobernador del motor.

De acuerdo con la evaluación técnica, se concluye que la tecnología Power Pallet® PP20 no es la más adecuada para el aprovechamiento de la MRU, debido a las restricciones del tamaño de partícula y a la limpieza del gas de síntesis. Dentro de los aspectos tecnológicos se resalta que este tipo de tecnología se encuentra en el TRL 8, el cual es un sistema completo y certificado a través de pruebas y demostraciones. Sin embargo, en las condiciones geográficas y climáticas, adicionales al tipo de biomasa empleada y a la operación continua se requiere realizar una evaluación exhaustiva de su influencia y evaluar otras tecnologías a una mayor escala.

De acuerdo con la cantidad estimada promedio anual de madera residual urbana de 144.667 toneladas, la energía disponible será de 1,72E+02 MWh por año, por lo tanto, la potencia máxima que podría instalar el Distrito sería de 20 kWe. Aunque este potencial es bajo comparado con otros tipos de biomasa, es una alternativa viable ambientalmente que permitirá la valorización y reutilización de la MRU.

Referencias

- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2014). *Demografía, población y diversidad*. Bogota, Colombia. Recuperado de: http://www.sdp.gov.co/portal/page/portal/PortalSDP/Noticias2014/SDP_realiza_lanzamiento_de_su_coleccion_de_libros_Bogota_Hum/02.DEMOGRAFIA.pdf
- All Power Labs. (2014). *Power pallet operation manual*. Recuperado de: <http://www.allpowerlabs.com/products/20kw-power-pallets>
- Aruna, P.B., Laarman, J. G., Araman, P., Coulter, E., y Cubbage, F. (1997). Used pallets as a source of pellet fuel: Current industry status. *Forest Products Journal*, 47(9), 51–56.
- Bratkovich, S., Bowyer, J., Lindburg, A., y Fernholz, K. (2009). *Reclaiming lumber products from waste wood*. Minneapolis. Recuperado de http://www.dovetailinc.org/report_pdfs/2009/dovetailreclaim0109.pdf
- Fernández, K., Martínez, D., y López, M. (2015). *Revisión y análisis de las asociaciones de recicladores en Bogotá diseñando una estrategia de negocio para la valorización y reutilización de residuos sólidos*. (Tesis de pregrado). Universidad del Rosario, Bogotá, Colombia. Recuperado de: <http://repository.urosario.edu.co/bitstream/handle/10336/10445/1010204773-2015.pdf?sequence=10>
- Fonseca González, N.E (2003). *Estado del arte del uso del gas de gasificación termoquímica de biomasa (GG), en motores de combustión interna alternativos*. (Tesis de doctorado). Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España. Recuperado de: <http://oa.upm.es/10905/>
- García Barriga, H. (1968). Árboles de la Sabana de Bogotá. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*, 13(50), 273–277.

- Held, J. (2012). *Gasification - Status and technology* ; Rapport SGC 240, (June), 48. Recuperado de: <http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/SGC240.pdf>
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2007). *"Biomasa: Gasificación."* Madrid. Recuperado de: <http://www.idae.es/publicaciones/biomasa-gasificacion>
- IDAE, y ESCAN, S. A. (2008). *Biomasa: Industria*. Madrid. Retrieved from http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10980_Biomasa_industria_A2008_A_402485e2.pdf
- Jaramillo Henao, G., y Zapata Márquez, L. M. (2008). *Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia*. (Tesis de Especialización). Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Recuperado de: <http://tesis.udea.edu.co/handle/10495/45>
- Ministerio de Vivienda Ciudad y territorio. (2015). *Guía para la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, control y actualización de los PGIRS*. Bogota, Colombia. Recuperado de: [http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/PGIRS/PGIRS de Segunda Generación/Guía para la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, control y actualización de los PGIRS.pdf](http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/PGIRS/PGIRS%20de%20Segunda%20Generación/Guía%20para%20la%20formulación,%20implementación,%20evaluación,%20seguimiento,%20control%20y%20actualización%20de%20los%20PGIRS.pdf)
- Moratorio, D., Rocco, I., y Castelli, M. (2012). Conversión de residuos sólidos urbanos en energía. *Memoria de Trabajos de Difusión Científica Y Técnica*, 10, 115–126. Recuperado de: http://www.um.edu.uy/docs/10_conversion_de_residuos_solidos_urbanos-en_energia.pdf
- OpEPA. (2016). *Árboles de Bogotá y sus arbustos*. Retrieved April 15, 2017, from http://www.opepa.org/index.php?option=com_content&task=category§ionid=10&id=82&Itemid=30
- Primadera S.A.S. (2017). *Madera urbana, el renacer de la madera*. Recuperado de: <http://www.primadera.com/maderaurbana>
- Pujoldevall Sánchez de Toledo, O. (2015). *Diseño y construcción de un sistema de generación eléctrica mediante gasificación de biomasa*. (Tesis de licenciatura). Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Recuperado de: <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/25234/TFG.pdf?sequence=1>
- Rocha O, J., Vesga, N., y Pinto, S. (2011). *Evaluación exergética del proceso de extracción de aceite de palma africana*. Universidad Industrial de Snatander.
- Serrato Monroy, C. C., y Lesmes Cepeda, V. (2016). *Metodología para el Cálculo de Energía Extraída a Partir de Biomasa en el Departamento de Cundinamarca*. (Tesis de pregrado). Universidad Distrital Francisco José De Caldas, Bogotá Colombia.
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2015). *Disposición Final de Residuos Sólidos Informe Nacional Elaborado 2015*. Bogota, Colombia. Recuperado de: <http://www.superservicios.gov.co/content/download/10760/88380>
- Toval Martinez, I. (2014). *Estudio de viabilidad, dimensionamiento e instalación eléctrica en una planta de Cogeneración a partir de gasificación de biomasa de 2 MW*. Universidad Politecnica de Cartagena. Recuperado de: <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/4003/pfc5721.pdf?sequence=1>
- UAESP. (2011). *Caracterización de los residuos sólidos institucionales, pequeños productores generados en la ciudad de Bogotá D.C*. Bogota D.C. Recuperado de http://www.uaesp.gov.co/uaesp_jo/images/documentos/Caracterizacion/institucionales_02-29-2012.pdf
- Viloria, J. R. (2013). *Energías renovables. Lo que hay que saber* (2a edición). Madrid: Ediciones Paraninfo, S.A. Recuperado de: <https://books.google.com/books?id=yKh2AgAAQBAJ&pgis=1>