

# Caracterización físico-química de pellets producidos a partir de mezclas 50/50 carbón bituminoso/madera residual

## Physico-chemical characterization of pellets produced from mixtures 50/50 bituminous coal / wood

Recibido: 19-11-2014 Aceptado: 21-04-2015

Luis Eduardo Atuesta Boada<sup>1</sup>  
Fabio Emiro Sierra Vargas<sup>2</sup>

### Resumen

Los biocombustibles, demandan procesos de caracterización y transformación confiables que aseguren su adecuado proceso de fabricación para que los usuarios finales los utilicen sin riesgo alguno. Alrededor del 4,42% de los biocombustibles que se comercializan a nivel mundial se presentan como aglomerados o pellets. Teniendo en cuenta que Colombia es un país con altas reservas de carbón y que como país agrícola produce grandes cantidades de residuos orgánicos, se encontró que la mezcla de estos dos productos presenta beneficios desde el punto de vista energético y de combustión, facilitando su quema y disminuyendo emisiones tanto de material particulado como de gases con contenido de azufre. Se presentan los resultados de la caracterización según normas internacionales de pellets producidos en el Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Nacional de Colombia de mezclas 50/50 de carbón antracita y madera. La evaluación fisicoquímica se hizo aplicando parámetros de la norma Austriaca ONORM M7135, con el fin de evaluar cada uno de los ítems allí establecidos. Además, se dan a conocer los resultados de las pruebas y los análisis de la caracterización de estas mezclas, así como su poder calorífico según norma ASTM D5865 11a y su resistencia al impacto según norma ASTM D440-86. Adicionalmente se discuten las ventajas y desventajas desde el punto de vista ambiental que acarrea el uso de los biocombustibles aglomerados.

**Palabras Clave:** pellets; biomasa; poder calorífico; Caracterización de biomasa.

<sup>1</sup> Colombiano. Ing. Mecánico e Industrial de la Universidad de Pamplona (Colombia). Ms (c) en Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá (Colombia). e-mail: leatuestab@unal.edu.co.

<sup>2</sup> Colombiano. PhD en Ingeniería - Energías Renovables de la Universidad de Kassel (Alemania). Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá (Colombia). e-mail: fesierav@unal.edu.co.

## Abstract

Biofuels demand characterization and reliable processes to ensure proper manufacturing process for end users in order to use them safely. About 4.42% of biofuels that are marketed globally are presented as agglomerates or pellets. Considering that Colombia is a country with high coal reserves and, as an agricultural country, produces large amounts of organic waste, our results show that the mixture of these two products has benefits in terms of energy and combustion, facilitating burning and decreasing the emissions of both particulate material and sulfur-containing gases. This article presents the results of the characterization as international pellets produced in the Laboratory for Renewable Energy of the National University of Colombia for 50/50% mixture of wood and anthracite. The physicochemical parameters evaluation was made using the standard Austrian ONORM M7135, in order to evaluate each of the items established. Also test results and analysis of the characterization of these mixtures and their calorific value according to ASTM D5865 11a and the impact resistance according to ASTM D440-86 are shown. Additionally the advantages and disadvantages are discussed from an environmental point of view related to the use of biofuels agglomerates.

**Keywords:** Pellets; biomass; calorificvalue; characterization of biomass.

## Introducción

Las fuentes de biomasa del sector forestal e industria maderera en Colombia, generan 1,9 megatoneladas de residuos al año (UPME, 2003), que se pueden usar para la producción de energía al ser sometidos a un proceso de compactación (producir pellets) para aumentar su densidad energética; de esta manera su uso energético es más eficiente en procesos térmicos tales como la combustión directa o la gasificación (Carrasco, 2008). Los residuos de los bosques naturales y de los cultivados (plantaciones energéticas), son recursos renovables, que generalmente, son dejados en el área cultivada como desechos, sin tener en cuenta que en procesos modernos de conversión (gasificación, pelletizado) se puede generar energía térmica o eléctrica a gran escala, enfocados hacia la sustitución de combustibles fósiles.

Los residuos de los bosques naturales son una importante fuente de biomasa que actualmente es poco

explotada. Se considera que, de cada árbol extraído para la producción maderera, sólo se aprovecha comercialmente un porcentaje cercano al 20%. Se estima que el 40% es dejado en el campo en las ramas y raíces, a pesar de que el potencial energético es mucho mayor como se muestra en la Tabla 1; el otro 40% se queda en el proceso de aserrío, en forma de astillas, corteza y aserrín (BUN-CA, 2002), que convertidos en energía se producirían 268 MWh/año (UPME, 2003).

**Tabla 1.** Distribución energética de un árbol.

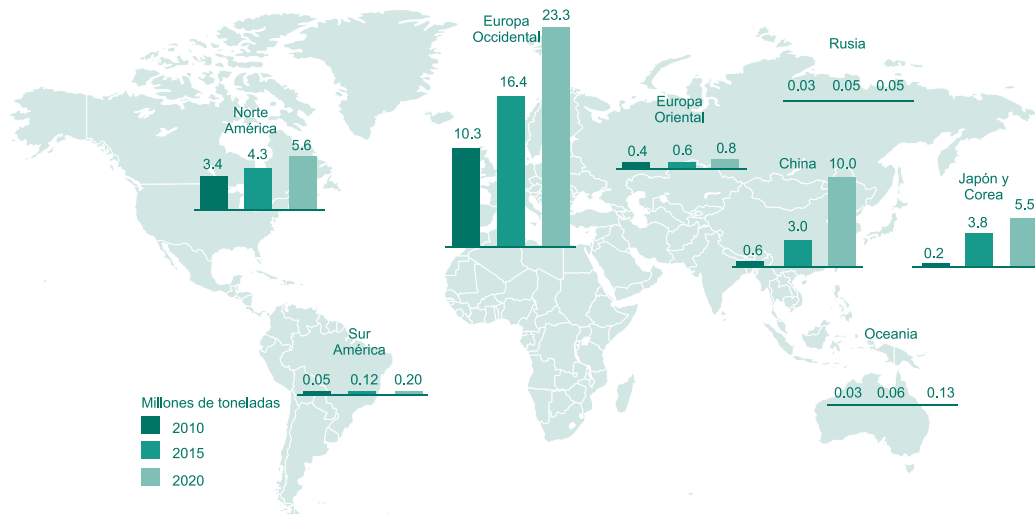
| Parte del árbol | Distribución en % |
|-----------------|-------------------|
| Ramas           | 6-22              |
| Hojas           | 1-6               |
| Tronco          | 74-86             |
| Corteza         | 3-16              |
| Raíces          | 21-33             |

**Fuente:** BUN-CA, 2002.

Otro de los residuos considerados son los de las grandes plantaciones de árboles o plantas cultivadas con el fin específico de producir madera y en algunos casos energía. Para ello se seleccionan árboles o plantas de crecimiento rápido y bajo mantenimiento, las cuales usualmente se cultivan en tierras de bajo valor productivo. Su período de cosecha varía entre los tres y los diez años, el potencial energético de estos residuos es aproximadamente de 383 MWh/año (BUN-CA, 2002). Esto representa el aprovechamiento de los recursos del medio forestal y maderero, para producir energía térmica o eléctrica. La tecnología se basa en reacciones de descomposición térmicas y de oxidación según la cantidad de oxígeno aportada en los mismos (Bilbao, 2009), estas son:

- **Combustión:** Aplicación de elevadas temperaturas con relación estequiométrica completa o con exceso de oxígeno donde se libera dióxido de carbono, agua, cenizas y calor.
- **Gasificación/pirolisis:** Aplicación de elevadas temperaturas (entre 500 °C y 800 °C) (Ramírez *et al.*, 2011), con cantidades oxígeno inferiores a las necesarias para brindar una relación estequiométrica, sin permitirse una combustión completa, liberando en el proceso monóxido y dióxido de carbono, hidrocarburos, hidrógeno y metano.

El consumo de pellets en Europa se está incrementando rápidamente (Cansino *et al.*, 2012). Según se observa en la Figura 1, la proyección del consumo de pellets en Europa hasta el año 2010 se incrementó 2,5 veces, lo cual aumentó la participación de las importaciones del 12% de la producción en el año 2006 al 34% en el 2010.



**Figura 1.** Proyección del consumo mundial de pellets.

Fuente: Cochi, 2011

El fin de producir pellets de mezclas carbón/madera, es aprovechar las propiedades energéticas del carbón y las propiedades aglomerantes de la madera, para obtener un producto comprimido (pellet) con mayor densidad energética que los pellets de 100% madera y menores emisiones contaminantes que si quemara 100% carbón.

Kg/cm<sup>2</sup>, tiempo de cierre 15 segundos, el molde utilizado fue de 19 mm de diámetro.

## Materiales y Métodos

### Producción de pellets

En este estudio de características de la biomasa para producir combustibles sólidos específicamente pellets de mezclas con carbón mineral, se planteó la caracterización de la mezcla 50/50 carbón/madera y el estudio de las normas que regulan los parámetros de producción, caracterización y calidad.

### Materiales

En la fabricación de los pellets de la muestra analizada se utilizó aserrín de madera residual de la industria maderera (carpinterías de la ciudad de Bogotá) y carbón antracita de la zona cundiboyacence de Colombia. Para tamizar el carbón y el aserrín, se usó el tamizador modelo Rx-29 de marca W.S.Tyler, para tener una granulometría de carbón entre 600 y 850 µm. En la Figura 2 se muestra la prensa pelletizadora de marca *Amertek* modelo 2003 utilizada para producir los pellets. Los parámetros de operación de la máquina fueron: presión de cierre 24,6



**Figura 2.** Prensa Pelletizadora

Fuente: Laboratorio de Plantas Térmicas y Energías Renovables. Universidad Nacional de Colombia- Sede Bogotá.

### Métodos

Los métodos de producción de pellets más conocidos a presión son: matriz plana, matriz anular, tornillo de extrusión y prensa hidráulica.

En la producción de los pellets se utilizó una prensa hidráulica con una matriz de 19 mm, y los siguientes

materiales: aserrín de madera tamizado y seleccionado en tamaño menor a 850  $\mu\text{m}$ . En la selección del carbón se utilizaron varios tamices, y para la muestra de la granulometría se tomó como punto de partida la comprendida entre 850  $\mu\text{m}$  y 600  $\mu\text{m}$ , para obtener los primeros resultados, y a partir de estos inferir sobre la granulometría que dé las mejores condiciones para la fabricación de pellets de mezclas carbón/madera.

Determinadas las condiciones de la muestra se mezclaron en una proporción 50/50 en peso (30 gramos de aserrín y 30 gramos de carbón). Obtenida la mezcla se produjeron tres muestras de pellets para hacer las pruebas por triplicado; posteriormente se hizo el análisis correspondiente.

En la caracterización de los pellets se tomó como referencia la Norma ONORM M7135, que estableció los criterios de evaluación de calidad en cuanto a producción, transporte, almacenamiento y consumo final; es una de las más antiguas, de mayor rigor y completas en este campo.

Durante la caracterización se determinaron las propiedades físicas y químicas de los pellets (Oberberger and Thek, 2003), evaluando los siguientes ítems:

- **Dimensiones:** Se determinó la dimensión de los pellets de acuerdo a la norma ÖNORM M 7135 por medida de longitud y el diámetro de la muestra.

- **Densidad a granel:** El volumen y el peso de un pellet se midió para determinar la densidad a granel, de acuerdo a la norma ÖNORM M7135; para el peso se usó una balanza calibrada con una precisión de 0,001 gramo, y para el volumen se usó una probeta.

- **Contenido de agua:** El contenido de agua se calculo pesando la muestra de combustible (cerca de 100 g), antes y después de secarse a 105 °C de acuerdo con la norma ÖNORM G 1074. C.H. = ((Peso Húmedo - Peso seco)/ Peso Húmedo)\*100%.

- **Contenido de ceniza:** El contenido de ceniza se midió por la pérdida de ignición de una muestra a 550 °C de acuerdo a la norma ASTM D-5142-09.

- **Poder calorífico:** El poder calorífico de la muestra se calculó en una bomba calorimétrica de acuerdo a la norma ASTM D-5865-04; esta prueba se realizó en los laboratorios del servicio geológico colombiano.

- **Resistencia al impacto:** Las muestras se dejaron caer 4 veces desde una altura igual a 1,85 m a una placa

de metal. El peso retenido por las muestras se considera la resistencia de las muestras de acuerdo a la NORMA ASTM D440-86.

- **Resistencia al agua:** La prueba de resistencia al agua se aplicó siguiendo el procedimiento de la *American Society of Agricultural Engineers*, ASAE según lo refieren los autores (Lindley and Vossoughi, 1989), pues en el momento no existe ninguna prueba normalizada. Cada muestra se sumergió en agua a 27 °C durante 30 segundos, el valor de la resistencia se tomó como el porcentaje en peso de agua absorbida por la muestra.

- **Resistencia a la compresión ó resistencia al aplastamiento:** Es la carga máxima que un pellet puede soportar antes de agrietarse o romperse. La resistencia a la compresión de los productos densificados se determinó por la prueba de compresión diametral. Los pellets se colocaron entre dos placas planas, se aplicó un aumento de carga a una tasa constante de 5 N/seg hasta que el pellet de prueba colapsó por craqueo o rotura. La carga de rotura se lee en la curva de tensión-deformación registrada, la cual es la resistencia a la compresión, y se reporta como la fuerza o el esfuerzo máximo que resiste el producto densificado; este procedimiento se realizó aplicando la norma ASTM C39-96.

- **Análisis Inmediato:** En este conjunto de ensayos se determinaron los porcentajes de humedad, cenizas, materia volátil y carbono fijo (Sierra *et al.*, 2011).

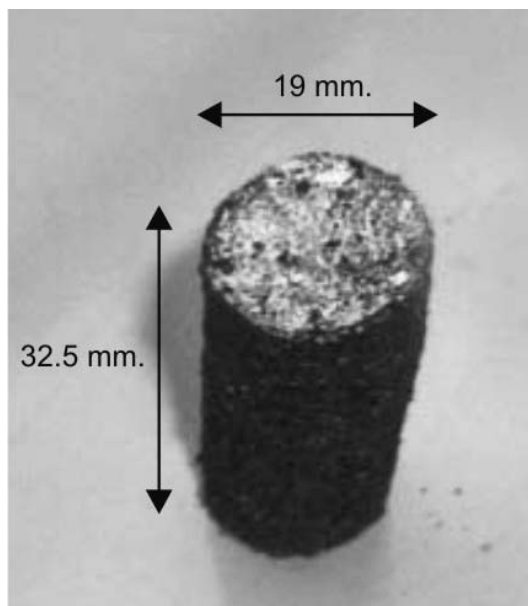
- **Análisis elemental:** Es una técnica que proporciona el contenido total de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre de una muestra de materiales sólidos o líquidos (Sierra *et al.*, 2011). La técnica se basó en la completa e instantánea oxidación de la muestra mediante una combustión con oxígeno puro a una temperatura aproximada de 1000 °C.

## Resultados y discusión

Los pellets producidos en el experimento se presentan en la Figura 3; aunque las dimensiones están por encima de los de la norma austriaca ÖNORM M7135, se utilizaron para evaluar los demás parámetros de la norma.

En la Tabla 2 se presenta la comparación entre los parámetros de la norma austriaca ÖNORM M7135 con los resultados de las pruebas de los pellets.

Se analizan y discuten los resultados obtenidos de las pruebas aplicadas a los pellets de acuerdo a los métodos antes mencionados:



**Figura 3.** Pellet de mezcla carbón/madera.  
**Fuente:** Los autores.

• **Dimensiones:** Comparando los resultados obtenidos con los criterios evaluados en la norma austriaca ÖNORM M7135, se nota que en cuanto a las dimensiones de los pellets no se cumple con esta norma, pues estas deberían estar entre 6 y 10 mm, pero al comparar estos parámetros con la norma europea CEN/TS 14961 especificaciones y propiedades para los pellets (CEN/TS EN 14961-2, 2012), la norma sueca SS 18 71 20 especificación de tres clases de pellets en función del tamaño y de la cantidad de cenizas que generan y la norma italiana CTI R04/05 que establece los parámetros de calidad de los pellets de biomasa con fines energéticos, se afirma que los pellets objetos de esta investigación cumplen con el parámetro de dimensiones el cual debe ser menor o igual a 25 mm (Duca *et al.*, 2014); los demás parámetros de estas normas son muy similares, por esta razón se tomó como referencia la norma ÖNORM M7135 para producir y evaluar el comportamiento de los pellets.

• **Densidad a granel:** En cuanto a la densidad a granel de los pellets se cumple con lo expuesto en la norma, ya que el valor obtenido fue de 933,33 kg/m<sup>3</sup>; esto indicó que con la mezcla de madera-carbón se cumplió con los valores de la norma. Una baja densidad tiene un efecto negativo sobre la densidad de energía y por lo tanto en los costos de transporte y la capacidad de almacenamiento tanto para el productor y el usuario final de pellets. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

• **Contenido de agua:** En la humedad obtenida en la prueba (10,28) se mostró ligeramente por encima del valor de expuesto en la norma (<10), esto dependió básicamente de la calidad de la madera y del carbón utilizado. El contenido de agua tuvo una influencia negativa sobre el poder calorífico neto, la eficiencia de la combustión y la temperatura de la combustión.

**Tabla 2.** Comparación de parámetros de la norma austriaca ÖNORM M7135 contra resultados de las pruebas a los pellets de mezclas madera carbón.

| Criterio                    | Unidad            | Ö-Norma M7135 | Resultado de las pruebas |
|-----------------------------|-------------------|---------------|--------------------------|
| Diámetro                    | mm                | 4-10          | 19                       |
| Longitud                    | mm                | <5*d          | 32,5                     |
| Peso                        | g                 | -             | 8,6                      |
| Poder calorífico            | MJ/kg             | 18            | 24,2                     |
| Resistencia a la abrasión   | %                 | <2,3          | -                        |
| Densidad                    | Kg/m <sup>3</sup> | >600          | 933,3                    |
| Contenido de ceniza         | %                 | <0,5          | 2,9                      |
| Contenido de agua           | %                 | <10           | 10,28                    |
| Contenido de azufre         | %                 | <0,04         | 0,4                      |
| Contenido de carbono fijo   | %                 | -             | 48,12                    |
| Contenido de cloro          | %                 | <0,02         | -                        |
| Contenido de nitrógeno      | %                 | <0,03         | 1,12                     |
| Contenido de Hidrógeno      | %                 | -             | 5,1                      |
| Aglomerante                 | %                 | <2            | 0                        |
| Resistencia al impacto      | %                 | -             | 38,4                     |
| Resistencia al agua         | %                 | -             | 85,0                     |
| Resistencia a la compresión | N                 | -             | 4896                     |

**Fuente:** Los autores

• **Contenido de ceniza:** El contenido de ceniza de la muestra de la mezcla fue de 2,90 en porcentaje de masa, muy por encima del valor de la normas (<0,5); este valor se ve incrementado por el contenido de ceniza de carbón que según estudio del carbón (Peña, 2011), es alto para los diferentes tipos de carbón mineral existentes en la naturaleza; todas las muestras analizadas presentaron contenidos de ceniza por encima del 4,5%. Debe tenerse en cuenta que entre mayor sea la cantidad de ceniza en el carbón o combustible sólido, menor será el calor

obtenido, aumentándose los problemas de manejo y disposición de las grandes cantidades de ceniza producidas (Uribe, 1986).

- **Poder calorífico:** El poder calorífico obtenido de la muestra fue de 24,2 MJ/Kg, superior a valores obtenidos de muestras de maderas sin ser mezcladas con otro material. Esto es importante para el uso final de biocombustible ya que permite obtener gran cantidad de energía en pocas cantidades de combustible (densidad de energía).

- **Resistencia al impacto:** El peso medio inicial de los pellets fue de 8,6 g; al cabo de la cuarta caída el peso registrado fue de 3,3 g. La pérdida de peso tras las caídas es evidente, con esto se muestra que el material no está lo suficientemente compacto para resistir las operaciones de transporte, almacenamiento y uso final sin que se desintegre o reduzca a tamaños más pequeños, el cual sería inconveniente para usos industriales por el manejo de finos o material particulado producto de la desaglomeración de los pellets (Krugger *et al.*, 2012).

- **Resistencia al agua:** El porcentaje medio en peso de agua absorbida por las muestras fue de 15%, entonces la resistencia al agua de la muestra es de 85%; este valor está en el límite inferior admisible (Lindley and Vossoughi, 1989), ya que al estar expuestos a la humedad estos absorberían agua de ambiente y perderían gran parte de las propiedades físicas que los caracterizan. Además la humedad afecta negativamente el proceso de combustión haciéndolo más lento, con pérdida de la eficiencia y causando daños prematuros en los sistemas de alimentación.

- **Resistencia a la compresión:** El ensayo de resistencia a la compresión simula el esfuerzo de compresión debido al peso de los pellets de arriba sobre los de abajo durante el almacenamiento en contenedores o silos, y el aplastamiento de los pellets en un transportador de tornillo en alimentación de sistemas automáticos de calefacción o calderas. Los resultados de la prueba dieron un fuerza máxima soportada de 4896 N, un esfuerzo máximo de 14,06 N/mm<sup>2</sup> con un desplazamiento máximo de 3,62 mm.

- **Análisis inmediato:** El contenido del carbono fijo de la muestra fue de 48,12 en porcentaje de masa; aunque no hay parámetro de comparación en la norma, este se obtiene de restar al total del carbono el contenido de cenizas el material volátil y la humedad en porcentaje de masa. Entre más alto sea este valor, más material sólido se tendrá para ser quemado; es importante para calcular la eficiencia en equipos de combustión (Severs *et al.*, 2007).

- **Análisis elemental:** El contenido de azufre de la muestra analizada fue de 0,40% de masa; este valor es bastante superior al reglamentado por la norma de combustibles aglomerados que debe ser de 0,04% en porcentaje de masa; este valor es afectado por la mezcla de la madera con el carbón. Si se observa, en la mezcla con el carbón disminuye el contenido total de azufre en el combustible, si se compara con el uso del carbón mineral al 100%. Esto mejora las condiciones de la combustión desde el punto de vista ambiental al reducir las emisiones de SOx. El contenido de nitrógeno de la muestra fue de 1,12 en porcentaje de masa, comparado con el valor de referencia de la norma austriaca (<0,03); es superior por el alto contenido de nitrógeno del carbón. Los resultados del análisis se ven afectados por los contenidos de los mismos compuestos del carbón (Jiancheng *et al.*, 2014), pues se sabe que la madera contiene bajo contenido de contaminantes. Un alto contenido de nitrógeno es perjudicial ya que se producirían emisiones de NOx, de gran preocupación por las medidas ambientales que se están tomando en la evaluación de nuevos combustibles.

## Conclusiones

- La muestra analizada correspondió una proporción 50/50 carbón antracita/madera, con una granulometría de carbón entre 600 y 850 µm; haciendo referencia a que la prueba de impacto y las demás se hicieron por triplicado, los resultados muestran baja resistencia a la compresión (38,4%), que puede asociarse al tamaño de grano del carbón.

- La mezcla de carbón/madera para la formación de un combustible aglomerado, tiene ventajas en cuanto al aumento del poder calorífico por unidad volumétrica y la densidad a granel. El hecho de usar carbones con alto contenido de azufre, cenizas y nitrógeno incrementa el valor admisible de acuerdo a la norma hecha para biomásas; sin embargo reduce el contenido de azufre, ceniza y nitrógeno respecto a si se usara solo carbón. El control de estos parámetros es de gran importancia por el impacto ambiental y por el manejo de los productos de la combustión.

- De acuerdo a los parámetros evaluados en la norma se cumplieron los siguientes: longitud (32,5 mm), peso (8,6 g), poder calorífico (24,2 MJ/Kg), densidad a granel (933,3 Kg/m<sup>3</sup>) y resistencia al agua (85%), con valores medianamente superiores a la norma, esto indica que es posible la producción de pellets de mezclas carbón/madera.

- El uso de mezclas de biomasa lignocelulósicas como son los residuos de madera y carbones pobres, esto es carbones con alto contenido de azufre y ceniza, permite combinar las propiedades positivas de los dos materiales; utilizando la buena capacidad de aglomeración y bajo contenido de azufre de las biomasa y buen poder calorífico del carbón. Estas mezclas pueden potencializar el uso industrial de carbones que actualmente no se comercializan en Colombia debido a altos contenidos de azufre y ceniza.

## Agradecimientos

Al Servicio Geológico Colombiano, por facilitar parte de los equipos para las pruebas realizadas en este estudio. A la Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá, por facilitar el uso del laboratorio de plantas térmicas y energías renovables.

## Referencias

- American society for testing and materials. (1998). ASTM. C39-96: Standard test method of compressive strength of cylindrical concrete specimens. *Anual book of ASTM standards*, 04.02, 17-21.
- Bilbao Duñabeitia, R. (2009). *Aprovechamiento termoquímico de la biomasa*. Aragón, España.
- BUN-CA. (2002). *Manuales sobre energía renovable: Biomasa/Biomass. Fortalecimiento de la capacidad en energía Renovable para America Central*. FOCER, Costa Rica.
- Cansino, J., Pablo-Romero, M. P., Román, R., and Yñiguez, R. (2012). Promotion of biofuel consumption in the transport sector: An EU-27 perspective. *Renewable and Sustainable Energy*, 6013–6021.
- Carrasco Garcia, J. E. (2008). *Combustión directa de la biomasa. Master en energías renovables y mercadeo energético 2007/2008*. EOI escuela de negocios. p 1-30.
- CEN/TS EN 14961-2. (2012). Solid biofuels – Fuel specification and classes - Wood pellets for non-industrial use. *The European Committee for Standardization*, CEN (TC335), 40.
- Cocchi, Maurizio. *Global wood pellets industry market and trade study*. IEA Bioenergy, Task 40 Sustainable Bioenergy Trade. p 1-190.
- Duca, D., Riva, G., Pedretti, E. F., and Toscano, G. (2014, Junio). Wood pellet quality with respect to EN 14961-2 standard and certifications. *Fuel*, 135, 9-14.
- Jiancheng, Y., Rui, S., Shaozeng, S., Ningbo, Z., Ning, H., Hong, C. (2014, May). Experimental study on NOx reduction from staging combustion of high volatile pulverized coals. Part 1. Air staging. *Fuel Processing Technology*(126), 166-275.
- Krugger-Emden, H., Wirtz, S., and Scherer, V. (2012, Septiembre). An experimental investigation of mixing of wood pellets on a forward acting grate in discontinuous operation. *Powder Technology*(233), 2261-277.
- Lindley, J., and Vossoughi, M. (1989). Physical properties of biomass briquettes. *Transactions of the ASAE, American Society of Agricultural Engineers*, 32(2), 361-366.
- Obernberger, I., and Thek, G. (2003, Julio). Physical characterization and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behavior. *Biomass and bioenergy*(27), 653-669.
- Peña Urueña, Mary Luz. (2011). *Caracterización de cenizas de algunos carbones colombianos in situ por retrodispersión gamma-gamma*. Maestría en ciencias-química. Universidad nacional de Colombia. p 1-110. Bogotá-Colombia. 2011.
- Ramírez Rubio, S., Sierra, F. E., and Guerrero, C. A. (2011). Gasificación de materiales orgánicos residuales. *Ingeniería e Investigación*, 122-132.
- Severs, W., Degler, H., and Miles, J. (2007). *La producción de energía mediante vapor, aire o gas*. (B. G. Ing. Jose, A cura di) Barcelona, España: Reverté.
- Sierra, F., Guerrero, A., Murcia, A., and Castillo, P. (2011). *Pellets de Biomasa y sus aplicaciones*. Bogotá D.C., Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

UPME. (2003). *Potencialidades de los cultivos energéticos y residuos agrícolas en Colombia*. Resumen ejecutivo, Unidad de planeación minero energética, Bogotá.

Uribe B., C. A. (1986). *Introducción a la Tecnología del Carbón Origen Composición, Propiedades, Clasificación*. - Informe No 1980, Ingeominas, Bogotá.