

Preparación y Caracterización Física del Biocombustible Sólido del Lirio Acuático (*Eichhornia crassipes*)

Jorge A. da C. B. D'Agua⁽¹⁾, Roberto G. Pereira^{(2)*}, Francisco J. V. Marinho⁽³⁾

Universidad Federal Fluminense, Rua Passo da Pátria Nº156, Campus da Praia Vermelha, Bloco E, Bairro São Domingos, CEP 24.210-240, Niterói, RJ-Brasil: (1) Programa de Pos-Graduación en Ingeniería Mecánica, PGMEC (e-mail: jdagua@ig.com.br); (2) Depto. de Ingeniería Mecánica, PGMEC/MSG/PGEB (e-mail: temrobe@vm.uff.br); (3) Depto. de Ingeniería Civil, (e-mail: varejaomarinho@yahoo.com.br)

*autor a quien se debe ser dirigida la correspondencia

Recibido Jul. 29, 2014; Aceptado Oct. 9, 2014; Versión final recibida Dic. 5, 2014

Resumen

El objetivo de este trabajo fue la preparación y caracterización física de biocombustible sólido usando la biomasa del lirio acuático para su valorización. Este trabajo incluye la caracterización de las propiedades del lirio acuático deshidratado, el desarrollo de un proceso de fabricación en briquetas y la caracterización de las briquetas propiedades a temperatura ambiente. Las propiedades analizadas varían dependiendo de la fuerza ejercida sobre la briqueta ya que la presión de la densificación afecta fuertemente sus propiedades físicas. Basado en los resultados del estudio, se concluye que estos biocombustibles pueden ser producidos a nivel industrial, constituyendo una buena fuente alternativa de energía.

Palabras clave: biocombustible sólido, biomasa, briqueta, lirio acuático

Preparation and Physical Characterization of Solid Biofuel made from Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*)

Abstract

The aim of this work was the preparation and the physical characterization of solid biofuel made from biomass of water hyacinth for its valorization. This work included the characterization of the properties of dehydrated water hyacinth, the finding of a process to transform them into briquettes and the characterization of the briquettes at room temperature. The analyzed properties depend on the charge exerted over the briquette since densification pressure strongly affects the physical properties of the briquette. Based on the results of study it is concluded that the biomass fuel could be produced at industrial level, being a good source of non conventional energy.

Keywords: solid biofuel, biomass, briquette, water hyacinth

INTRODUCCIÓN

La Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés) proyecta escenario (Blue Map Scenario) en que el mundo moviéndose para una la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en 2050 de 50% del nivel de 2005 necesitará aumentar en 300% el empleo de la biomasa (ASME, 2010). Esta perspectiva demandará una búsqueda por nuevos materiales a ser empleados como fuentes de energía. La crisis energética que se vive actualmente originada en el reconocimiento del carácter no renovable de los combustibles fósiles (Gómez et al., 2012). La sustitución de los hidrocarburos por fuentes alternativas sustentables se ha transformado en una prioridad de los últimos años (Morero y Campanella, 2013). Por todo esto, el incremento de la seguridad en el abastecimiento energético, la reducción de la dependencia de fuentes de energía de origen fósil, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero se encuentran entre los principales motivos que han llevado a los diferentes países a impulsar la producción de biocombustibles en la búsqueda de sustentabilidad (Salazar et al., 2012; Cervi et al., 2011; Manzonea et al., 2015; Souza y Schaeffer, 2013).

En este contexto, de la necesidad de uso de energías inagotables, sostenibles y respetuosas con el medio ambiente, se espera que la biomasa ocupe un puesto bastante relevante (IDESIA, 2011). Una de las ventajas más importantes de la biomasa consiste en que permite reemplazar carbón de forma sustentable (Van der Stelt, 2011). A partir del año 2010, la biomasa sólida representó la mayor fuente de energía renovable (García-Ubaque et al, 2013). Estas políticas requieren la adopción de tecnologías que permitan el desarrollo de investigaciones relacionadas con la biomasa (Sánchez y Cardona, 2008; Cornoa et al., 2014). Esto ha llevado al desarrollo de sistemas de calentamiento híbrido solar-biomasa como ejemplo de solución 100% renovable (Chasapis et al., 2008).

Es importante tener en cuenta que la utilización de biomasa como combustible, requiere la adaptación de una cadena de suministro que permita atender el acopio de los residuos generados, su selección y homogenización y que garantice la disponibilidad de las cantidades requeridas en el proceso productivo (Gómez et al., 2012). Una de las mayores limitaciones que presenta el aprovechamiento energético de biomasa residuales es la baja densidad de los materiales, lo cual plantea problemas en el almacenaje, transporte e etc., para evitar este inconveniente, se procede a compactarlos obteniéndose productos elaborados como briquetas y los pelets (Ortiz, 2008). La técnica de la densificación tiene sido ampliamente estudiada por medio de innumerables trabajos científicos utilizando distintas fuentes de biomasa. De los aportes de la literatura, se mencionan: Chen et al. (2009) reportaron nuevas técnicas en China donde se aprovechan residuos agroforestales para la producción de energía. Larson et al. (2008) han descrito el experimento de una máquina en escala piloto usada para la compactación de materiales de baja densidad. Kaliyan y Morey (2009) mencionaron varios factores que afectan la resistencia y la durabilidad de los productos densificados. Chou et al. (2009) utilizaron el proceso de moldaje a pistón (piston-mold-process en inglés) para la densificación de la paja de arroz y salvado de arroz. Roy y Corscaddenb (2012) reportaron estudios de la combustión y las emisiones de briquetas de biomasa en una estufa de leña doméstica para 15 briquetas de biomasa producida a partir de una gama de materias primas incluyendo el heno y hierba. Nuriana et al. (2014) investigaron las características de las cáscaras de durian (en inglés) en briquetas como material combustible. Zhang y Guo (2014) presentaron un estudio de las propiedades físicas de la Caragana korshinskii Kom (en inglés) como materia prima en la producción de combustible sólido ecológico.

De los aportes de la literatura en estudios del lirio acuático (*Eichhornea crassipes*), se mencionan: "Penfound y Earle (1948) estudiaron el lirio acuático y observaron que en un período de 8 meses, 10 plantas generaron 600.000 o más, cubriendo una área de 0,4 ha de agua dulce" (Alvarez et al., 2004). Koser et al. (1982) reportaron los primeros estudios donde utilizan el lirio acuático (*Eichhornea crassipes*) en una experiencia de compactación y extrusión en briquetas con objetivos energéticos. Roquete Pinto et al. (1987) investigaron la capacidad de remoción de metales pesados y la obtención de efluentes de alta calidad en sistema de tratamiento que minimice la contaminación ambiental. Alvarez et al. (2004) investigaron el lirio acuático para complementar el tratamiento de agua. Oliveira et al. (1997) utilizaron la energía solar para su secamiento, obteniendo buenos resultados. Pereira et al. (2011) presentaron el empleo del lirio acuático en la producción de biogás.

Para considerar la viabilidad para la producción de biocombustibles, es importante tener en cuenta aspectos como composición del material para las características del proceso de combustión (Rhén, C. et al., 2007; Molino et al., 2014). En la Tabla 1 se presenta una breve descripción del lirio acuático y otros combustibles. Estos resultados muestran que las biomasa consideradas tienen un contenido de carbón ligeramente por encima del 50% del que posee el combustible de referencia (carbón bituminoso), lo cual repercute significativamente en su poder calorífico (García-Ubaque et al., 2013). Un aspecto generalmente limitante para la combustión de biomasa herbáceas es el contenido de cenizas, generalmente elevado en biomasa herbáceas (Werther, 2000, Vassilev, 2010, 2014, Viana et al., 2012), así como la composición temperatura de fusión de estas cenizas, que pueden resultar en problemas de sinterización o slagging (Fernandez-

Llorente et al., 2005, 2006, Vega et al., 2010, 2012). Para el proceso de combustión, es importante tener en cuenta que los contenidos de azufre y cenizas del lirio acuático son significativamente mayores, aspectos potenciales que afectan de manera sensible las emisiones atmosféricas durante el proceso de combustión. Para considerar la viabilidad para la producción de biocombustibles, es importante tener en cuenta aspectos como ubicación, periodicidad del cultivo o de la cosecha, rendimiento y uso (Cardona et al., 2012). En la Tabla 2 se presenta una breve descripción de rendimiento del lirio acuático y otras biomásas.

Tabla 1: Propiedades fisicoquímicas del lirio acuático, las biomásas y combustible de referencia (carbón bituminoso). (a) (Oliveira, 1997, 1998) y (b) (García-Ubaque et al., 2013)

Material	Lirio acuático (a)	Biomassa de aserín (b)	Biomassa de poda distritales (b)	Carbón bituminoso medio volátil (b)
<i>Análisis Elemental</i>				
%C	39,39	47,09	48,17	77,70
%N	1,01	1,44	1,10	1,11
%H	5,93	6,10	5,99	4,67
%O	44,61	45,37	44,74	15,82
%S	0,45	0,00	0,00	0,70
%Ceniza	10,76	2,49	4,65	12,10
<i>Propiedades Termodinámicas</i>				
PCS (MJ/Kg)	15,52	16,88	18,23	30,85
PCI (MJ/Kg)	14,25	15,16	15,77	30,29
%Humedad inicial	90,16	25,0	23,50	16,20

Tabla 2: Rendimiento del lirio acuático e otras especies potenciales para la producción de biocombustibles. (a) (Cardona et al. 2012); (b) (Gómez et al. 2012) y (c) (Oliveira et al., 1997, 1998)

Especie	Nombre científico	Rendimiento	Ref.
Pasto elefante	<i>Pennisetum purpureum</i>	360 y 400 t/ha/año de materia verde	(a)
King grass	<i>Pennisetum hybridum</i>	240 y 360 t/ha/año de materia verde	(a)
Pasto aguja	<i>Brachiaria humidicola</i>	10 t/ha/año de materia seca	(a)
Pasto panamá, caña japonesa	<i>Saccharum sinense</i>	48-50 t/ha/corte	(a)
Eucaliptus	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	20-35m ³ /(ha x año) en turnos de 6-8 años	(b)
Eucaliptus	<i>Eucalyptus grandis</i>	25m ³ /(ha x año) en turnos de 6 – 8 años	(b)
Pinus	<i>Pinus patula</i>	27m ³ /(ha x año) en turnos de 30 años	(b)
Pinus	<i>Pinus Oocarpa</i>	10-40m ³ /(ha x año) en turnos de 23-30 años	(b)
Lirio acuático	<i>Eichhornea crassipes</i>	120 t/ha/año de materia seca	(c)

Se observa en la Tabla 2 una revisión sobre las variedades más comunes y el lirio acuático para analizar su potencial como materiales para la producción de biocombustibles. Para ello se considera rendimiento de producción por hectárea y por año o rendimiento volumétrico, como características principales para determinar su potencial uso. Como resultado, se presentan los pastos elefante, king grass, *eucalyptus camaldulensis*, *p. patula* como los más apropiados para su exploración en procesos de producción de biocombustibles (Cardona et al., 2012; Gómez et al., 2012) y el lirio acuático (Oliveira et al., 1997, 1998).

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar una nueva fuente de energía para Ibero América. El objetivo específico es analizar los procesos involucrados en la preparación y las propiedades físicas del lirio acuático como biocombustible sólido.

MATERIALES Y MÉTODOS

El Lirio acuático (*Eichhornea crassipes*) (MARTIUS) Solms – Laub es una planta acuática macrófita con distribución en todos los países tropicales, perteneciente a la familia de las Pontederiaceas, de origen amazónica (Gopal, B., 1987). En la Figura 1 se presenta el material. La colecta del material y los métodos fueron siguiendo el procedimiento descrito en la norma (Technical Specifications CEN/TS 14780: 2005). Se utilizaron material procedente del río Bambu, laguna de Maricá, Maricá, Rio de Janeiro, Brasil. El material es homogéneo con partes de distintas extensiones (rango 30 mm a 85 mm) y edades.



Fig.1: Lirio acuático (*Eichhornea crassipes*).

Preparación del material

Para un proceso completo de briquetado a partir de un material tipo residuo agrícola o forestal astillado constaría de varias etapas previas como: eliminación de materiales indeseables, reducción granulométrica y secado (Ortiz, 2008). En la Figura 2 se muestran la preparación, el corte y proceso de lavado siguiendo el procedimiento descrito en la norma (Technical Specifications CEN/TS 14588: 2003 y CEN/TS 14780: 2005). Después de esta etapa, el proceso de trituración fue considerado necesario para reducir el tamaño del material (Mani et al., 2006) y obtener una mejor homogeneidad. En la Figura 3 se muestra lo material triturado. Por lo tanto, una licuadora industrial Metvisa modelo LQ-15 - 15 L, con potencia del motor de 1,1 kW y velocidad de rotación del espiral máxima de 3450 fue utilizado en el proceso.

La determinación de la humedad total

La determinación de la humedad total fue realizado antes y después del proceso de secado siguiendo el procedimiento descrito en la norma (ASAE S358.2 DEC99) para las forrajeras y similares (plantas y hojas). Fueran utilizadas 25g de muestras, en tres recipientes cada y puestas en una estufa eléctrica Nova Ética, con convección forzada de aire en temperatura de 103 ± 2 °C durante un período de 24 horas, siendo realizadas tres repeticiones.

Proceso de secado

Las biomásas para cumplen con las condiciones mínimas para ser utilizadas como combustible alternativo en procesos industriales, debido a sus condiciones de: alto contenido de oxígeno y humedad y su naturaleza hidrofílica; requiere ser tratada previamente (Medic, 2012; Mani, 2006). Los procesos de pretratamiento más utilizados para acondicionar la biomasa son de tres tipos principalmente: a) *bioquímicos*; b) *mecánicos* y c) *termoquímicos*, como el secado, la pirolisis rápida, la pirolisis lenta, la peletización y la torrefacción (Chew, 2011). Un método simplificado fue adoptado, de acuerdo con Barbosa et al. (2006). Para pesar el material triturado fue utilizada una balanza electrónica Núcleo PR 2000 NW y otra GEHARA BG 1000 con precisión de 0,01g y las muestras fueran introducidas en dos estufas eléctricas Nova Ética con una cámara de 0,081 m³ y otra con 0,0975 m³, respectivamente. El proceso de secado utilizaron el aire a una temperatura de 70 °C con convección forzada durante un período de 24 horas. Los resultados obtenidos fueran calculados utilizandose de la ecuación (1).

$$M_f = M_i \times [(100 - U_i) / (100 - U_f)] \quad (1)$$

siendo: M_f = masa final del producto (g); M_i = masa inicial del producto (g); U_i = humedad inicial del producto (%); U_f = humedad final del producto (%).



Fig. 2: Material "in natura".



Fig. 3: Material triturado.

Determinación de la densidad volumétrica

La determinación de la densidad volumétrica del material sin densificación, fue especificada en procedimientos (Technical Specifications CEN/TS 15103:2005) y determinada por medio de una balanza electrónica Núcleo - PR2000 NW con precisión de 0,01g.

La fabricación de las briquetas

En este trabajo se utilizaron la técnica de pistón y molde para la preparación de las briquetas (preparación de especímenes) con el empleo de una máquina de ensayo EMIC con capacidad de 0-120.000 kgf para el proceso de densificación. En la Figura 4 se muestra el montaje correspondiente el pistón y molde.

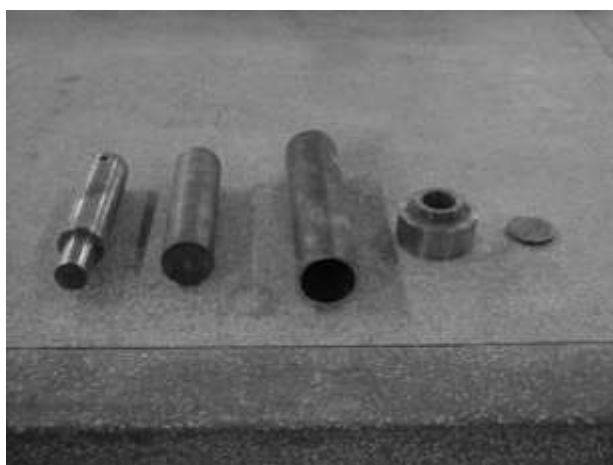


Fig. 4: El conjunto de piezas do Pistón-Molde.

En la figura se aprecian detalles como la longitud del tubo molde (Acero SAE 1020) expuesto (300 mm) con diámetro externo (48,5mm) y diámetro interno (42mm), los segmentos de un embolo dividido en dos secciones (Acero SAE 1020), base (Acero SAE 1045) y tapón (Acero SAE 1020). En la Figura 5 se observa el material deshidratado en el molde siendo comprimido.



Fig. 5: Proceso de compresión.

El procedimiento es el siguiente: (1) La masa deshidratada del material (Figura 6) fue pesada utilizándose de balanzas electrónicas Núcleo PR 2000 y GEHARA B6 1000 con precisión de 0,01g para la preparación de especímenes; (2) el material fue colocado dentro del molde; (3) el conjunto fue puesto entre las partes superiores e inferiores del mecanismo de compresión de la máquina de ensayo EMIC; (4) el contenido del molde fue comprimido con la fuerza de compactación previamente fijada ($15, 10, 7, 4, 2, 1 \times 10^3$ Kgf); (5) el conjunto fue retirado de la prensa; (6) una nueva fuerza fue aplicada en el molde para que la briqueta fuese retirada; (7) una balanza electrónica fue utilizada para pesar la briqueta; (8) con un calibrador se obtuvo la longitud y el diámetro de la briqueta para la caracterización de su volumen y el grado de esbeltez (la relación de la longitud por el diámetro de la briqueta); (9) la densidad aparente fue encontrada dividiéndose la masa por el volumen de la respectiva briqueta (especímenes); (10) después de pesar, las muestras fueron almacenadas en embalajes de polietileno siendo lacradas y guardadas hasta el momento de las análisis.



Fig.6: Material deshidratado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 3 se muestran los resultados de humedad inicial y de la densidad volumétrica, se observa que que la humedad contenido en la forma deshidratada está en conformidad con procedimiento descrito en la norma (Technical Specifications CEN/TS 14961: 2005 Annex A) que determina: Humedad $\leq 10\%$. Para la densidad volumétrica en la Tabla 3 se puede apreciar que la forma deshidratada encontrarse es menor valor y se nota que la forma triturada es mayor. Estos valores permiten proyectar las características de las instalaciones industriales de fabricación.

En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos en estudio, se observa que la densidad aparente con la fuerza de compactación de 15×10^3 (Kgf) es mayor. Desde el punto de vista de la fuerza de compactación,

se nota que el grado de esbeltez (la relación de longitud por el diámetro de la briqueta) es mayor a baja presión y se nota una relación inversa con el aumento de la fuerza de compactación. Además, se muestra que la densidad aparente incrementa con el aumento de la fuerza de compactación y el grado de esbeltez disminuye con este aumento. En estudio de las briquetas se observa que la rigidez es mayor a partir de la fuerza de compactación de 4×10^3 (Kgf). Estos valores permiten proyectar las características de las briquetas a ser fabricadas.

Tabla 3: Propiedades del material antes de la densificación.

Forma	Humedad inicial (%)	Densidad volumétrica (Kg/m ³)
"In natura"	92,79	143,28
Triturada	92,79	450,86
Deshidratada	8,16	42,87

Tabla 4: Propiedades del material después de la densificación.

Fuerza de compactación (Kgf)	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Grado de esbeltez (medio)	Volumen (medio) (cm ³)	Peso (medio) (g)	Densidad aparente (medio) (g/cm ³)
1×10^3	42	300,00	7,14	415,42	41,70	0,10
2×10^3	42	80,85	1,92	112,87	40,13	0,37
4×10^3	42	48,97	1,17	61,24	40,05	0,56
7×10^3	42	34,77	0,83	48,15	40,11	0,84
10×10^3	42	31,11	0,74	43,07	39,40	0,94
15×10^3	42	26,85	0,66	37,18	39,70	1,04

Seguidamente, se presentan los resultados de experiencias en briquetadora de pistón realizadas de acuerdo con (Ortiz, 2008), se nota que la densidad obtenida con la fuerza de compactación de 15×10^3 (Kgf) en trabajo ($1,04 \text{ g/cm}^3$) es menor a de los residuos industriales ($1,15 \text{ kg/m}^3$), corteza de pino ($1,11 \text{ kg/m}^3$), corteza de pino y residuos industriales (50:50) ($1,09 \text{ kg/m}^3$), corteza de eucalipto y residuos industriales (50:50) ($1,10 \text{ kg/m}^3$) y a de lo eucalipto con ramas finas y hojas ($1,06 \text{ kg/m}^3$), con la fuerza de compactación de 10×10^3 Kgf en trabajo ($0,94 \text{ g/cm}^3$) es menor a de lo eucalipto con ramas gruesas ($0,97 \text{ kg/m}^3$).

En este estudio la densificación se desarrolló en la temperatura ambiente lo que caracteriza una calidad muy importante en la relación a otras biomásas. Zhang et al. (2001) sugieren el empleo de la biomasa químicamente tratada en la fabricación de la briqueta de madera. En el proceso no hubo necesidad de aglutinantes. En la Figura 7 se muestra las imágenes de las briquetas, se observa que el material deshidratado es compactado solidamente en la forma de la briqueta y el tamaño de las fibras influye en la apariencia de las briquetas. De acuerdo con los requerimientos planteados por las normas internacionales consultadas (O NORM M7135, DIN 51731/DIN plus, CEN/TS 14961:2005) para la densidad aparente (rango $1,0\text{-}1,4 \text{ g/cm}^3$), las briquetas elaboradas a partir del lirio acuático con fuerza de compactación en estudio con 15×10^3 Kgf, cumplen con las condiciones mínimas para ser utilizadas como combustible alternativo en procesos industriales.



Fig. 7: Imágenes de las briquetas

CONCLUSIONES

La biomasa sólida combustible del lirio acuático (*Eichhornea crassipes*) fue preparada y caracterizada.

Dentro de todas las pruebas realizadas, se nota que al aumentar la fuerza de compactación afecta la densidad aparente y su grado de esbeltez. Además, se muestra que la densidad aparente incrementa con el aumento de la fuerza de compactación y el grado de esbeltez disminuye con este aumento.

Para la rigidez se puede apreciar que es mayor a partir de la fuerza de compactación de 4×10^3 (Kgf). Estos valores permiten proyectar las características de las instalaciones industriales de fabricación.

El trabajo demuestra la viabilidad de la preparación desde el lirio acuático de biocombustible sólido con y sin densificación. Se observa también que para este proceso en la preparación de las briquetas no fueran necesarios el calentamiento y aglutinantes.

Se demuestra el potencial de este material, desde el punto de vista físico, para ser briquetado a partir de la fuerza de compactación de 4×10^3 (Kgf).

Con altos rendimientos de materia verde por hectárea al año, su precocidad y la gran abundancia de este recurso torna el lirio acuático una alternativa a la madera empleada actualmente, entre otros.

Los resultados, permiten concluir que el uso del lirio acuático puede tener un enorme potencial como fuente energética para los países de Ibero América.

AGRADECIMIENTOS

El autor R. G. Pereira agradece al CNPq el apoyo prestado.

REFERENCIAS

Alvarez, S.G. y otros tres autores. *Caracterización de Agua Residual de Curtiduría y Estudio del Lirio Acuático en la Recuperación de Cromo*. Información Tecnológica: 15 (3), 75-80, (2004)

ASAE S358.2 DEC99. American Society of Agricultural Engineers. Norma Americana sobre forrajes. Standards Engineering, Practices Data Moisture Measurement – Forages, Nueva York, USA (2000)

ASME, American Society of Mechanical Engineers. *A Guide to Facts and Perspectives*. ASME, Nueva York, USA (2010)

Barbosa, L. C. A. y otros cuatro autores. *Influência da temperatura do ar de secagem sobre o teor e a composição química do óleo essencial de Lippia alba (Mill) N.E. Brown*. Quimica Nova: 29(6), 1221-1225, (2006)

Cardona, E. M., Rios, L. A. y Peña, J. D. *Disponibilidad de Variedades de Pastos y Forrajes como Potenciales Materiales Lignocelulósicos para la Producción de Bioetanol en Colombia*, doi:10.4067/S0718-07642012000600010, Inf. Tecnol., (23), 6, 87-96 (2012)

Cervi, R. G., Esperancini, M. S. T., y Bueno, O. C. *Viabilidad Económica de la Utilización de Biogás para la Conversión en Energía Eléctrica*. Inf. Tecnol., (22), 4, 3-14, (2011)

Chasapis, D. y otros cuatro autores. *Monitoring and operational results of a hybrid solar-biomass heating system*. Renewable Energy: (33), 1759–1767, (2008)

Chen, L., Xing, L. y Han, L. *Renewable energy from agro-residues in China: Solid biofuels and biomass briquetting technology*. Renewable and Sustainable Energy Reviews: (13),9, 2689-2695, (2009)

Chew, J. y Doshi V. *Recent advances in biomass pretreatment – Torrefaction fundamentals and technology*. Renewable and Sustainable Energy Reviews: (15), 4212-4222, (2011)

Chou, C. S., S. H. Lin y W. C. Lu. *Preparation and characterization of solid biomass fuel made from rice straw and rice bran*. Fuel Processing Technology: (90), 980-987,(2009)

Corno, L., Pilub, R., Adania, F. *Arundo donax L.: A non-food crop for bioenergy and bio-compound production*, _doi: 10.1016/j.biotechadv.2014.10.006, Biotechnology Advances, (32), 8, 1535–1549 (2014)

DIN 51731/DIN plus, Norma Alemana sobre Biocombustibles, Berlín, Alemania (2000)

Fernández Llorente, M. J., y Carrasco García, J. E. *Comparing methods for predicting the sintering of biomass ash in combustion*. Fuel: (84), 14–15, 1893–1900, (2005)

- Fernández Llorente M.J. y otros tres autores. *Combustion in bubbling fluidised bed with bed material of limestone to reduce the biomass ash agglomeration and sintering*. Fuel: (85), 2081-2092, (2006)
- García-Ubaque, C. A., Vaca-Bohórquez, M. L. y Talero, G. F. *Aprovechamiento de Biomasa Peletizada en el Sector Ladrillero en Bogotá-Colombia: Análisis Energético y Ambiental*, doi: 10.4067/S0718-07642013000300013, Inf. Tecnol. (en línea), (24), 3, 115-120 (2013)
- Gómez, E. A., Ríos, L. y Peña, J. D., *Madera, un Potencial Material Lignocelulósico para la Producción de Biocombustibles en Colombia*, doi: 10.4067/S0718-07642012000600009, Inf. Tecnol. (en línea) (23), 6, 73-86, (2012)
- Gopal, B. *Water Hyacinth*. Elsevier Aquatic Plant Studies: (1), (1987)
- IDESIA., *La biomasa procedente de cultivos agrarios: energía renovable*, doi: 10.4067/S0718-34292011000100001, IDESIA (Chile), (en línea), (29), 1, 5-6 (2011)
- Kaliyan, N. y R.V. Morey. *Factors affecting strength and durability of densified biomass products*. Biomass and Bioenergy: (33), 337-359, (2009)
- Koser, H. J. K., G. Schmalstieg y W. Siemers. *Densification of water hyacinth — basic data*. Fuel: 61 (9), 791-798, (1982)
- Larsson, S. H. y otros tres autores. *High quality biofuel pellet production from pre-compacted low density raw materials*. Bioresource Technology: (99), 7176-7182, (2008)
- Mani, S., L. G. Tabil y S. Sokhansanj. *Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses*. Biomass and Bioenergy:(30), 648-654 (2006)
- Manzonea, M. , Berganteb, S., Facciottob, G. .*Energy and economic sustainability of woodchip production by black locust (Robinia pseudoacacia L.) plantations in Italy*, doi: 10.1016/j.fuel.2014.09.122, Fuel, (en línea), (140), 555–56 (2015)
- Medic, D. y otros cuatro autores. *Effects of torrefaction process parameters on biomass feedstock upgrading*. Fuel: (91), 1, 147-154, (2012)
- Morero, B. y Campanella, E. A. Simulación del Proceso de Absorción Química con Soluciones de Aminas para la Purificación Biogás. Información Tecnológica: (24), 1, 25-32, (2013)
- Molino, A. , Nanna, F., Villone A.. *Characterization of biomasses in the southern Italy regions for their use in thermal processe*, doi:10.1016/j.apenergy.2014.06.013, Applied Energy (en línea), (131), 180–188 (2014)
- Nuriana, W., Anisa, N. y Martana. *Synthesis Preliminary Studies Durian Peel Bio Briquettes as an Alternative Fuels*, doi:10.1016/j.egypro.2014.01.228, Energy Procedia (en línea), (47), 295–30, (2014)
- Oliveira, M. A. y otros tres autores. *Desidratação Solar da Planta Aquática Jacinto D'água para o Aproveitamento da Biomassa*. Congreso Ibero Americano de Ingenieria Mecánica, 3 , cód. 2-211, Havana, Cuba (1997)
- Oliveira, M. A. *Desidratação Solar da Planta Aquática Jacinto D' água para o Aproveitamento Energético da Biomassa*. Tesis de Maestría, PGMEC, UFF, Niterói, Brasil (1998)
- Ortiz, L. *Producción de biocombustibles sólidos de alta densidad en España*. Boletín del CIDEU: 5, 107-123, (2008). <http://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2718831.pdf>. Acceso: 24 de noviembre (2014)
- Ortiz, L. La biomasa como fuente de energía renovable. Ed. GAMESAL (en línea), ISBN: 84-95046-15-6, (2006)
- Ortiz et al. *Aprovechamiento de la Biomasa Forestal producida por la Cadena Monte-Industria. Parte III: Producción de elementos densificados*. (2003a). Disponible online en: <http://www.cismadeira.es/galego/downloads/biomasa3.pdf>. Acceso: 24 de noviembre (2014)
- Ortiz, L. Procesos de densificación de la biomasa forestal. Ed. GAMESAL (en línea), ISBN: 84-95046-25-3, (2003)
- Ortiz, L., Tejeda, A. y Vásquez, A. Aprovechamiento de la biomasa residual. (Parte III). Rev. CIS MADERA: 11, (2003)

- ÖNORM M7135, Norma Austriaca sobre Biocombustibles, Viena, Austria (2003)
- Pereira, R. G. y otros tres autores. *Production and characterization of biogas obtained from biomass of aquatic plants*. Renewable Energy and Power Quality Journal: (9), 1-4, (2011)
- Rhén, C. y otros tres autores. *Effect of raw material composition in woody biomass pellets on combustion characteristics*. Biomass and Bioenergy: (31), 66–72, (2007)
- Roquette Pinto, C. L., A. Caçonia y M. M. Souza. *Utilization of Water Hyacinth for Removal and Recovery of Silver from Industrial Wastewater*. Water Science and Technology: 14 (10), 89-101, (1987)
- Roya, M. M. y Corscaddenb, K. W. *An experimental study of combustion and emissions of biomass briquettes in a domestic wood stove*, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.05.003, Applied Energy (en línea), (99), 206–212 (2012)
- Sánchez, Ó. y Cardona, C. *Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks*. Bioresource Technology: (99), 5270–5295, (2008)
- Salazar, F., Cavazos, J. y Martínez, J. L., *Metodología basada en el Modelo de Referencia para Cadenas de Suministro para Analizar el Proceso de producción de Biodiesel a partir de Higuierilla*. Información Tecnológica: (23), 1, (2012)
- Souza, J. y Schaeffer, L. *Sistema de compresión de biogás y biometano*, doi: 10.4067/S0718-07642013000600002, Inf. Tecnol. (en línea), (24), 6 (2013)
- Technical Specifications CEN/TS 14588: 2003. CEN. Norma Europea sobre Biocombustibles sólidos, Solid biofuels – Terminology, definitions and descriptions, Bruselas, Europa (2003)
- Technical Specifications CEN/TS 14780: 2005. CEN. Norma Europea sobre Biocombustibles sólidos, Solid biofuels – Methods for sample preparation, Bruselas, Europa (2005)
- Technical Specifications CEN/TS 14961: 2005 Annex A. CEN. Norma Europea sobre Biocombustibles sólidos, Solid biofuels – Fuel specifications and classes, Bruselas, Europa (2005)
- Technical Specifications CEN/TS 15103: 2005. CEN. Norma Europea sobre Biocombustibles sólidos, Solid biofuels – Methods for the determination of bulk density, Bruselas, Europa (2005)
- Van der Stelt, M. y otros tres autores. *Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: a review*, Biomass and Bioenergy: (35), 3748-3762, (2011)
- Vassilev, S. V., Baxter, D. y Vassileva, C. G.. *An overview of the behaviour of biomass during combustion: Part II. Ash fusion and ash formation mechanisms of biomass types*. Fuel: 117, (2014)
- Vassilev, S. V. y otros tres autores. *An overview of the chemical composition of biomass*. Fuel: 89(5), 913–933, (2010)
- Vega, D.; Dopazo, R. y Ortiz, L. *Strategies for minimizing ash slagging in combustion of Mediterranean biomasses*. Actas del World Bioenergy, Jönköping, Suecia (Mayo, 2012). Acceso: 10 de noviembre (2014)
- Vega, D.; Dopazo, R.; Ortiz, L. *Slagging Risk of Mediterranean Biomasses for Combustion*. Actas del World Bioenergy, 25-27 Mayo, Jönköping, Suecia (2010). <http://www.svebio.se/sites/default/files/1322.pdf>. Acceso: 10 de noviembre (2014)
- Viana, H. y otros cuatro autores. *Fuel characterization and biomass combustion properties of selected native woody shrub species from central Portugal and NW Spain*. Fuel: (102), 737-745, (2012)
- Werther, J. y otros cuatro autores. *Combustion of agricultural residues*, doi: 10.1016/S0360-1285 (99)00005 2, Progress in Energy and Combustion Science (en línea), 26 (1),1–27 (2000)
- Zhang, X. y otros tres autores. *The effect of different treatment conditions on biomass binder preparation for lignite briquette*. Fuel Processing Technology: (73), 185-196, (2001)
- Zhang, J. y Guo, Y. *Physical properties of solid fuel briquettes made from Caragana korshinskii Kom*, doi: 10.1016/j.powtec.2014.02.025, Powder Technology (en línea), (256), 293–299 (2014)