



---

“CLEANER PRODUCTION INITIATIVES AND CHALLENGES FOR A SUSTAINABLE WORLD”

## Los Residuos Agrícolas y Cañeros como Alternativa Energética del Presente y del Futuro

P. F. Beltrán, J. B. C. Martínez, J. R. F. Veja, I. F. Acea, A. S. Medina, V.  
Mencia

\* Universidad de Cienfuegos. Email: pfundora@fmec.ucf.edu.cu

---

### Resumen

En el trabajo se realizan experimentos de deformación uniaxial de biomásas, en matriz cilíndrica, y se obtienen modelos matemáticos que simulan adecuadamente el comportamiento físico de las mismas. Los modelos obtenidos resultaron muy útiles para el diseño de briqueteadoras hidráulicas, con índices técnicos y económicos iguales o superiores a los reportados en la literatura especializada para esta tecnología, obteniéndose los mejores resultados cuando se producen briquetas tubulares. Se ha demostrado, teórica y experimentalmente, la mayor efectividad de las briquetas tubulares sobre las macizas en los procesos termoquímicos y de transformación de las biomásas, sobre todo, si estas provienen de residuos no leñosos, y las dimensiones geométricas de las briquetas se eligen convenientemente. Resulta importante destacar las condiciones en que se presentan los residuos agrícolas y cañeros, generalmente localizados en los campos de cosecha y centros de acopio, con humedades que oscilan entre el 12-20%, muy difíciles de reducir, con dimensiones muy disímiles de las partes componentes, siendo por demás difícil, en esos lugares, crear la infraestructura técnica y tecnológica capaz de solucionar el problema. La tecnología de densificación hidráulica, resulta la alternativa que mejor puede dar respuesta a las condiciones anteriores, por su adaptabilidad y por la movilidad de la briqueteadora, lo que le posibilita trasladarla hasta los dispersos lugares donde pueden estar localizadas las biomásas.

---

### 1. Desarrollo

La energía ha sido y es una necesidad básica de la sociedad a lo largo de su existencia. A nivel mundial se consumen aproximadamente 40 000 kcal/día per capita de energía, lo que supone 20.5 veces las necesidades alimenticias. El consumo energético está desigualmente repartido, correspondiendo las 4/5 partes a 1/4 de la población, es decir, aquella que habita en los 42 países más desarrollados.

El consumo de combustibles fósiles, aparte de su vida limitada, genera graves problemas de contaminación atmosférica como son la lluvia ácida, el efecto invernadero y la destrucción de la capa de ozono, debido a la emisión de óxidos de azufre y nitrógeno, dióxido de carbono y compuestos fluorados. Por otro lado, una fuente energética alternativa, la energía nuclear, es altamente contaminante, debido principalmente a los residuos que genera, los cuales permanecen activos

---

“CLEANER PRODUCTION INITIATIVES AND CHALLENGES FOR A SUSTAINABLE WORLD”

durante miles de años. A esto hay que añadir la peligrosidad de la operación de las centrales, lo que provoca el rechazo de la población.

Desde el punto de vista de la contaminación, las energías renovables se constituyen en un valuarte de las políticas energéticas nacionales, ya que contribuyen a abastecer la demanda con un escaso impacto ambiental, lo que constituye un pilar importante para el futuro, evitando además la dependencia energética de otros países.

La energía producida a partir de la biomasa, dentro de las renovables tiene, junto con la hidráulica, un papel preponderante en muchos países. Los residuos que resultan de la actividad agrícola y forestal, constituyen un amplio porcentaje de la biomasa. Hoy en día los residuos constituyen un gran problema medioambiental, por lo que pueden constituir un gran potencial energético, siempre que se solucionen sus graves problemas, entre los cuales se relacionan: el bajo potencial energético y su baja densidad, lo que ocasiona problemas de transportación y almacenamiento. Por medio de la densificación es factible aumentar la densidad de los residuos biomásicos, lo que facilita su manejo y permite su utilización como un combustible más homogéneo, solucionando el problema de los residuos y acondicionándolos para una posible utilización energética.

Los factores que limitan la combustión óptima de las materias leñosas son esencialmente físicos: la densidad aparente, la granulometría y la humedad, además de su disponibilidad, que en muchos países es determinante. El interés de la densificación es conferir a los residuos biomásicos características físicas muy cercanas a la de los materiales leñosos, permitiendo que muchos de ellos sean valorizados energéticamente.

Entre las biomásas, disponibles comercialmente hoy en día, la caña de azúcar ocupa un destacado lugar por sus altos rendimientos agrícolas. El rendimiento en materia seca de la caña de azúcar, oscila desde 27-90 tm/año, en dependencia del regadío, fertilización, métodos de cosecha, cultivo, etc. La caña es particularmente importante en nuestro país, pues ocupa el 27% de la superficie cultivable. Se puede decir, prácticamente, que se pueden obtener entre 5.6 y 7.6 toneladas de petróleo equivalente por hectárea de caña sembrada, al considerarse una producción de alcohol, a partir del jugo o de las mieles. Hay que señalar que en estos estimados, no se incluye el consumo de combustible para la obtención de cada uno de ellos, es decir, se expone sólo el valor bruto obtenible. Sin embargo, desde el punto de vista energético, existen potencialidades que se explotan de forma muy limitada, como es el caso del RAC, la cachaza, y el biogás, siendo el primero el que peores condiciones enfrenta, localizado en los campos de cosechas o en el mejor de los casos, en los centros de beneficio de la caña de azúcar, sin una tecnología apropiada para su empleo, que implique su densificación con calidad en los lugares

de localización, facilidades de transportación, manipulación, almacenamiento y la tecnología de combustión que garantice eficiencia elevada. La tabla 1 muestra los potenciales de biomasa cañeras y combustibles a partir de las mismas, en Cuba y América Latina. Lo anterior subraya la importancia del trabajo encaminado al aprovechamiento energético de los residuos de la cosecha cañera (RAC).

**Tabla 1. Producción de biomasa y combustibles a partir de la agroindustria azucarera-alcoholera de América Latina y Cuba.**

Subproductos tm/año	América Latina	Cuba
Bagazo (50% de humedad)	124 000 000	21 600 000
Cachaza (77% de humedad)	11 000 000	2 600 000
Hojas verdes	35 000 000	7 400 000
Hojas secas	31 000 000	6 550 000
Cogollo	31 000 000	6 550 000
Total del RAC	97 000 000	20 500 000
Aguas residuales (m <sup>3</sup> )	225 000 000	37 500 000
Biogás (m <sup>3</sup> )	450 000 000	75 000 000
Alcohol: jugo de caña (1)	7 166 000 000	-
Alcohol: mieles (1)	6 884 000 000	135 000 000

El uso de los residuos agrícolas y cañeros como alternativa energética, debe pasar la prueba de la factibilidad técnico-económica, y ello involucra a todas las tecnologías y procesos vinculados. Se conoce que la baja densidad natural que presentan las biomasa relacionadas, así como de la dificultad para la combustión de las mismas, constituyen las principales limitantes para su empleo como combustibles alternativos, no obstante, de resolverse estos problemas, se podrá disponer de un abundante potencial de estas, capaz de sustituir, en aplicaciones específicas, a los combustibles fósiles y a la leña, contribuyendo positivamente a mejorar el impacto ambiental.

El siguiente trabajo está dirigido al estudio de los factores fundamentales que posibiliten proponer las tecnologías apropiadas, para empleo de los residuos agrícolas y cañeros.

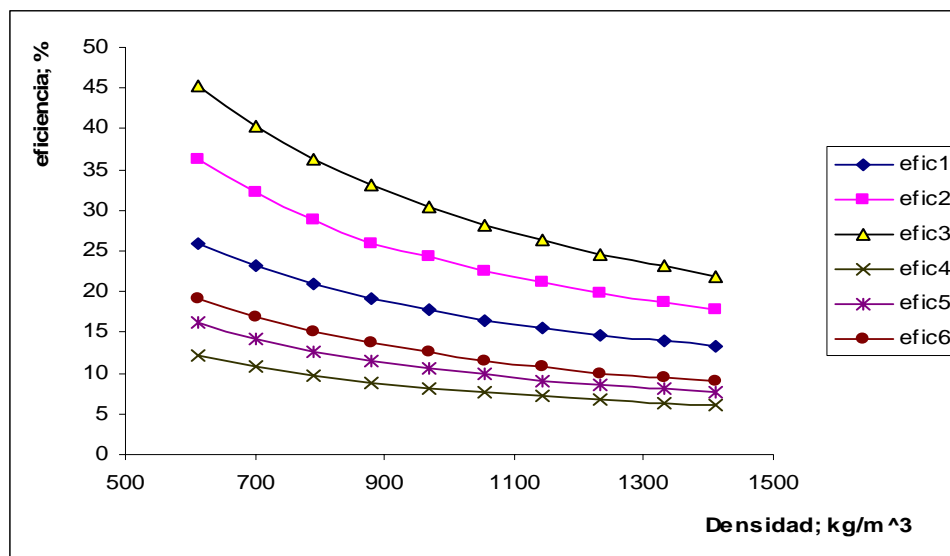
1. Densificación de los residuos agrícolas y cañeros, en forma de briquetas cilíndricas de diferentes dimensiones geométricas
2. Combustión de las briquetas:
  - a) De forma individual fuera de una cámara de combustión (Cámara de combustión abierta )
  - b) De varias briquetas, en una cámara de combustión cerrada

### **2a - Combustión de las briquetas (Cámara abierta). Eficiencia de la combustión**

Se diseñó un experimento, en el que se utilizaron briquetas cilíndricas tubulares de diámetros exteriores ( $D = 70, 100$ ) mm, diámetros del conducto ( $d = 28, 35, 40$ ) mm y longitud  $L = 100$  mm, producidas con residuos cañeros sin triturar, con una

humedad del 8%. Los resultados obtenidos (Figura 1), demuestran que en las condiciones dadas, la eficiencia del sistema térmico disminuye con el incremento del diámetro exterior (D) de la briqueta tubular, de forma más significativa que las variaciones de la densidad y/o el diámetro del conducto (d).

Los mejores resultados se logran para las briquetas de  $D = 70\text{mm}$ , de medias y bajas densidades, particularmente, con el diámetro del conducto mayor ( $d = 40\text{mm}$ ). Este comportamiento está determinado por el incremento de la velocidad de la reacción, debido a una mayor difusión del oxígeno, mayor intercambio a través del espesor de la briqueta, y a los volátiles que se generan durante el proceso de combustión. El incremento de la densidad favorece la velocidad de la transferencia térmica, sin embargo, ello reduce la difusión del oxígeno a través del espesor de la briqueta. No obstante, los menores espesores de las briquetas anteriores, aseguran las condiciones para una combustión con niveles de eficiencias iguales y superiores a los alcanzados en la combustión de la leña, en las mismas condiciones.



**Fig 1. Eficiencia térmica de la combustión de briquetas en cámara abierta:**

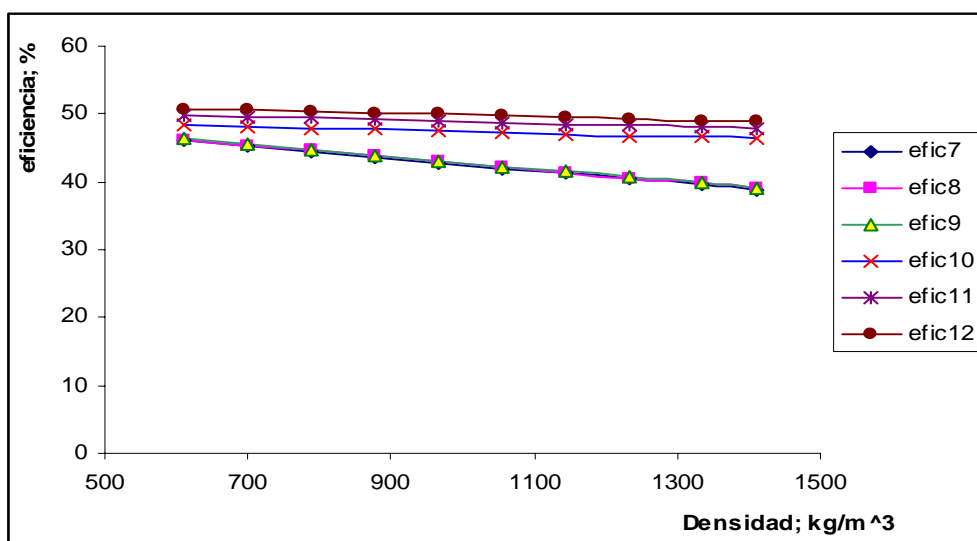
1)  $D = 70\text{ mm}$ ,  $d = 28\text{mm}$ ; 2)  $D = 70\text{mm}$ ,  $d = 35\text{mm}$ ; 3)  $D = 70\text{mm}$ ,  $d = 40\text{mm}$ ;

4)  $D = 100\text{mm}$ ,  $d = 28\text{mm}$ ; 5)  $D = 100\text{mm}$ ,  $d = 35\text{mm}$ ; 6)  $D = 100\text{mm}$ ,  $d = 40\text{mm}$

Las briquetas macizas ( $d = 0$ ) no fueron investigadas en este trabajo, pero estudios precedentes demostraron la dificultad de la combustión de las mismas, que se acentúa, con el incremento de la densidad y las dimensiones geométricas. En nuestro caso, las briquetas con diámetro del conducto  $d = 28\text{ mm}$ , también presentaron dificultades en la combustión, lo cual queda reflejado en el comportamiento de las curvas de eficiencia de la Fig. 1. Ello demuestra, que las briquetas macizas o tubulares que no posean el diámetro del conducto (d) apropiado, quedan inhabilitadas para la combustión en estas condiciones.

**2b- Combustión de las briquetas en cámara de combustión cerrada.**

En este experimento, se utilizaron 2 kg de briquetas, con similares características que las anteriores, pero la combustión se realizó en un fogón recuperativo eficiente. La eficiencia térmica obtenida se muestra en la Fig. 2. Los resultados mostrados son muy favorables, por cuanto permiten asegurar que las briquetas tubulares estudiadas, presentan un comportamiento que no varía significativamente con el incremento de la densidad, ni con la magnitud del diámetro del conducto (d) en el rango estudiado. Puede observarse, como coinciden las curvas de eficiencia cuando las briquetas presentan el diámetro exterior  $D = 70\text{mm}$  con los diferentes diámetros de conducto (d) (7, 8 y 9) y cuando el diámetro es  $D = 100\text{mm}$ , ocurre algo similar a lo anterior, pero puede distinguirse como el incremento del diámetro del conducto (d) favorece, aunque de forma poco significativa, el incremento de la eficiencia térmica de la combustión. Sin embargo, lo que parece contradictorio es el comportamiento del diámetro exterior (D) de las briquetas, que al aumentar, incrementa la eficiencia de la combustión. Cuando se utilizan en la combustión las briquetas macizas, y en particular, las de biomasa no leñosas, las dimensiones de las mismas deben ser las menores, y aun en estas condiciones, se requiere de un elevado exceso de aire y activación frecuente de la combustión.



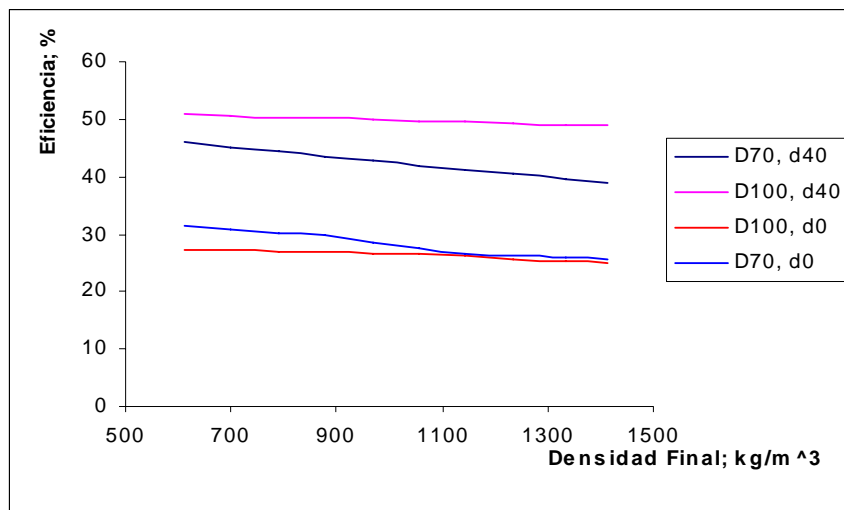
**Fig. 2 Eficiencia térmica de la combustión de briquetas en cámara de combustión cerrada**

- 7)  $D = 70\text{mm}$ ,  $d = 28\text{mm}$ ; 8)  $D = 70\text{mm}$ ,  $d = 35\text{mm}$ ; 9)  $D = 70\text{mm}$ ,  $d = 40\text{mm}$ ; 10)  $D = 100\text{mm}$ ,  $d = 28\text{mm}$   
 11)  $D = 100\text{mm}$ ,  $d = 35\text{mm}$ ; 12)  $D = 100\text{mm}$ ,  $d = 40\text{mm}$

En la Fig. 3 se muestra el comportamiento de las briquetas macizas y tubulares, bajo las condiciones precedentes. La capa de ceniza que cubre las briquetas dificulta la difusión del oxígeno al núcleo, afectando la eficiencia de la combustión,

las briquetas tubulares presentan el mismo comportamiento en la superficie exterior, pero la reacción química que tiene lugar en el conducto central de las mismas constituye la fase predominante, además del auto tiro de la briqueta por el conducto y del tiro de la chimenea, que obligan al aire primario, a orientarse. Ocurre un proceso de gasificación, y cada briqueta se convierte en un gasificador elemental, y en la medida que sea más difícil la combustión directa, más favorable será el proceso de transformación (gasificación). En estas condiciones, la ceniza que cubre las briquetas, así como el incremento de las dimensiones de estas, dejan de ser un problema, porque no es necesario activar el proceso de combustión para desprender la ceniza. El aire necesario puede ser controlado.

Los índices de eficiencia en la combustión, serán superiores a los de la leña y al de las briquetas macizas de similares dimensiones exteriores. En las Fig. 4 y Fig. 5 se observa esta diferencia. Un problema por solucionar, es el desarrollo de una tecnología de combustión apropiada, para el mejor aprovechamiento de las potencialidades energéticas de las briquetas tubulares.



**Fig. 3. Eficiencia térmica de briquetas tubulares de diámetro exterior, D = (70, 100) mm y diámetro del conducto, d = 40 mm y briquetas macizas de las mismas dimensiones exteriores**



**Fig. 4 Combustión de briquetas macizas en cámara de combustión semiabierta con revestimiento térmico**



**Fig. 5 Combustión de briquetas tubulares en cámara de combustión semiabierta con revestimiento térmico.**

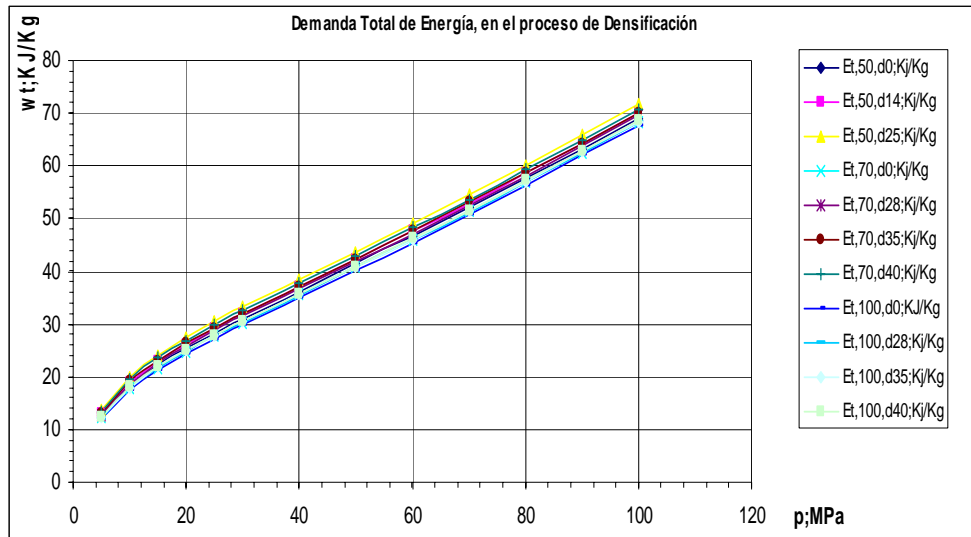
Sin embargo, los resultados de este trabajo posibilitan asegurar, que las briquetas tubulares cumplen su cometido en cualquier tecnología de combustión, siempre que se elijan convenientemente las dimensiones geométricas apropiadas.

### **3. Demanda energética de la densificación de residuos agrícolas cañeros, en forma de briquetas cilíndricas de diferentes dimensiones geométricas.**

Lo más importante a tener en cuenta en un proceso de densificación, lo constituye la demanda específica de energía necesaria para densificar una biomasa dada [kJ/kg], para obtener briquetas de calidad, es decir, con adecuada densidad final, resistencia mecánica y comportamiento en la combustión. El incremento de la densidad final favorece el incremento de la resistencia mecánica.

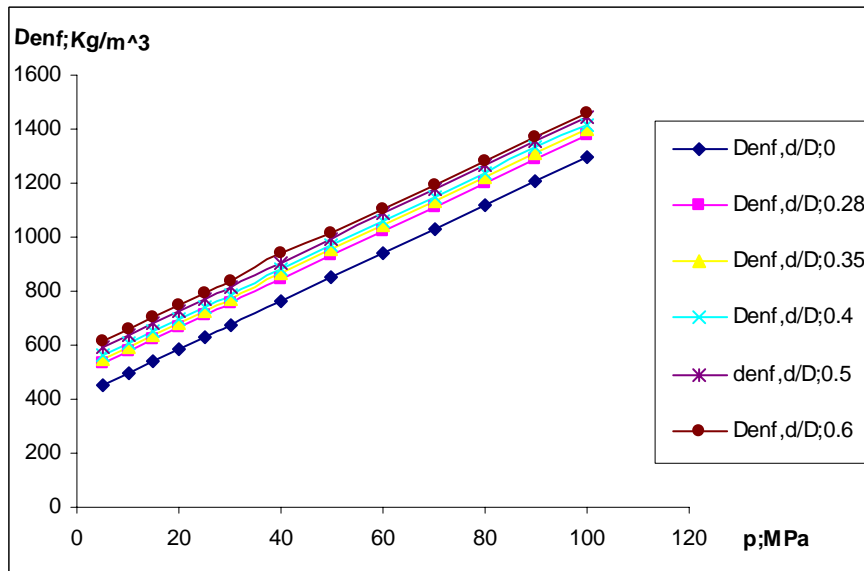
En este estudio, se utilizaron residuos cañeros sin fragmentar, con una humedad del 8% y temperatura ambiente, para producir briquetas de diferentes dimensiones geométricas. La Fig. 6 muestra el comportamiento energético del proceso de densificación. Puede observarse que no es significativa la diferencia de la demanda específica de energía de las briquetas macizas y tubulares estudiadas, lo cual permite producir indistintamente unas u otras sin gastos adicionales, sin embargo, la influencia en el incremento de la densidad final de las briquetas tubulares, respecto a las macizas no se puede despreciar, sobre todo cuando están en juego las perspectivas de una tecnología de densificación, hoy en día relegada. Tal es el caso de la tecnología de densificación hidráulica.





**Fig. 6 Demanda energética del proceso de densificación de los residuos cañeros.**

En los experimentos anteriores, se utilizaron las siguientes dimensiones para las briquetas: D = 50mm con d = (0, 14, 25) mm; D = 70mm con d = (0, 28, 35, 40) mm; D = 100mm con d = (0, 28, 35, 40)mm.



**Fig. 7 Densidad final de las briquetas de residuos cañeros para diferentes relaciones d/D**

La Fig. 7 muestra el incremento de la densidad final de las briquetas para las mismas presiones de densificación, a partir de hacerlas tubulares d/D > 0. La



relevancia de este comportamiento está en la posibilidad de las briqueteadoras hidráulicas de producir briquetas de calidad comparables con las otras tecnologías, lo cual las hace competitiva y en muchos casos superiores, al ser éstas más flexibles.

#### 4. Conclusiones

1. Aunque las briquetas tubulares son adecuadas para cualquier tecnología de combustión, con niveles de eficiencia superiores a la leña, deben utilizarse las tecnologías de combustión de cámara cerrada preferiblemente, para un mejor aprovechamiento de las potencialidades energéticas de las mismas.
2. En la combustión en cámara abierta se prefieren las briquetas tubulares de menores diámetros exteriores, y diámetros del conducto superiores a los 28 milímetros, y con densidades inferiores a  $950 \text{ kg/m}^3$ , con ello se alcanzan índices de eficiencia, para las condiciones anteriores, superiores a los alcanzados en la combustión de la leña. Sin embargo, cuando se emplean las tecnologías de combustión eficientes (cámaras cerradas), la única condición exigida, es que las briquetas sean tubulares con diámetros del conducto superiores a 25 milímetros.
3. El comportamiento de la combustión de las briquetas tubulares en un combustor, lo acerca más al comportamiento de un gasificador, dicho de otra forma, las briquetas tubulares al quemarse en una tecnología de combustión con cámara cerrada eficiente, la convierten de antemano en un gasificador, el comportamiento de los índices de eficiencia así lo demuestran.
4. La presencia del conducto central hueco en las briquetas, no incrementa significativamente la demanda específica de energía en el proceso de densificación, pero sí favorece el incremento de la densidad final, con relativamente bajas presiones de densificación.
5. Las briquetas tubulares producidas en briqueteadoras hidráulicas, se convierten en una atractiva y económica alternativa energética, que puede sustituir totalmente la leña y parcialmente al petróleo en algunas aplicaciones, introduciendo nuevos elementos ecológicos vinculados con la eficiencia en la combustión.

#### 5. Bibliografía

1. Comisión Europea. "Energía para el futuro: Fuentes de energías renovables. Libro blanco para una estrategia y un plan de acción comunitarios". 1997.

2. Cranford, Bruce et al. "The Energy, Environmental, and Economic Handbook". Desarrollado en colaboración con U.S. Department of Energy's (DOE's) y Office of Industrial Technologies (OIT). First Edition - September 1997. Web Site: \*\* Diciembre 1 de 1999.
3. Erickson, S.; Prior, M. The briquetting of agricultural wastes for fuel. Food and Agricultural Organization of the United Nations. 1990. 131p.
4. Faborode M. O., O'Callaghan J. R. "Theoretical analysis of the compression of fibrous agricultural materials". Department of Agricultural Engineering. University of Newcastle upon Tyne. 1986.
5. FAO "The briquetting of agricultural waste for fuel". ISBN 92-3-102918-0. 1990.[
6. FAO: Biomass energy in Asean Member Countries- Bangkok 1997. Web Site: <http://www.fao.org>.
7. Fundora Beltrán, Pedro. Estudio de la densificación de la paja de caña sin preparación previa con tecnología hidráulica para el perfeccionamiento de su proceso tecnológico. Tesis. Para optar por el grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Cienfuegos, Cuba, 2003.
8. Granada Álvarez, Enrique. "Estudio de la influencia de los parámetros humedad, temperatura y presión en el proceso de densificación, mediante autoaglomeración, de biomasa lignocelulósica residual". Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Minas, Universidad de Vigo, España. Tutores: Dr. Luis Ortiz Torres y Dr. Manuel Eusebio Vázquez Alfaya. 1999.
9. Intermediate Technology Development Group. "Stove and space heating". Humanity Development Library. Journal Boiling Point, No 38, 1997.
10. Martínez, M., Fernández, J.L. Economía de las fuentes renovables de energía. Ciencia (Mexico), 1986, No, 37, p.135-146.
11. Maruyama T., Mizoguchi C. "Briquetting and combustion characteristics of coal-wood composite fuel". Bio-coal pp. 551-558. 1981.
12. Nebias Armas, Fernando y otros. Caracterización de la paja de caña como combustible, CentroAzúcar (Santa Clara): /s.a/(s.n.):1986.
13. NODO50. "Las energías renovables son la única alternativa a largo plazo al cambio climático". Web Site: <http://www.nodo50.org/panc/Ere.htm#renovndx>. Actualizado 10 de Enero del 2000.
14. Ramesh Man Singh. Biobriquettes - a competitive fuel for cooking. Boiling Point No. 41 - Household Energy: The Urban Dimension (ITDG, 1998, 44 p.)

15. Verdecia Torres, David. Estudio técnico de la combustión de las briquetas cilíndricas de biomasa cañera. Tesis para optar por el grado científico de Master en Ciencias Técnicas. Cienfuegos, Cuba, 2002.