

Desempeño de la combustión de desechos industriales en un reactor de lecho fluidizado burbujeante*

Industrial Waste Combustion Performance in a Bubbling fluidized Bed Reactor**

Desempenho da combustão de dejetos industriais em um reator de leito fluidizado borbulhante***

*Gonzalo Guillermo Moreno-Contreras*****

*Juan Carlos Serrano-Rico******

*Jhon Alexander Palacios-Restrepo******

* Fecha de recepción: 29 de enero de 2009. Fecha de aceptación para publicación: 3 de julio de 2009. El artículo es resultado del proyecto de investigación del mismo nombre, financiado por la Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, con código de radicación SIUP P1-0027.

** Submitted on January 29, 2009. Accepted on: July 3, 2009. This article results from the research project of the same name, financed by the Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, registration SIUP-P1-0027.

*** Data de recepção: 29 de janeiro de 2009. Data de aceitação para publicação: 3 de julho de 2009. O artigo é resultado do projeto de pesquisa denominado *Desempenho da combustão de dejetos industriais em um reator de leito fluidizado borbulhante*, financiado pela Universidade de Pamplona, Pamplona, Colômbia, com código SIUP P1-0027.

**** Ingeniero mecánico. Magíster en Ingeniería Mecánica, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia. Profesor auxiliar del Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Pamplona. Correo electrónico: gmoren@unipamplona.edu.co.

***** Ingeniero mecánico. Magíster en Ingeniería Mecánica, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia. Profesor asistente del Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Pamplona. Correo electrónico: jcserrano@unipamplona.edu.co.

***** Ingeniero mecánico. Magíster en Ingeniería Mecánica, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia. Profesor auxiliar del Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Pamplona. Correo electrónico: japalacios@unipamplona.edu.co.

Resumen

El presente estudio muestra los resultados obtenidos al medir el desempeño de la combustión de biomasa (cisco de café y cascarilla de arroz) en un reactor de lecho fluidizado burbujeante. Al analizar los porcentajes de CO₂, O₂ y CO obtenidos en los gases de escape, se definieron las variables que afectan la combustión de esta biomasa y también los puntos óptimos de combustión y operación del reactor. Se sugieren alternativas para la utilización y aprovechamiento de este tipo de materia prima, ya que sus particulares características dificultan su aprovechamiento.

Palabras clave

Combustión en lecho fluidizado, residuos industriales, biomasa.

Abstract

This study presents the results obtained after measuring the performance of biomass combustion (coffee husks and rice husks) in a bubbling fluidized bed reactor. By analyzing the percentages of CO₂, O₂ and CO obtained from its emissions, it is possible to define the variables that affect the burning of such biomass as well as the optimum operation and combustion points of the reactor. Since the particular characteristics of this type of raw materials hinder its potential benefits, this study suggests alternatives for its better use and exploitation.

Key words

Fluidized bed combustion, factory and trade waste, biomass.

Resumo

O presente estudo mostra os resultados obtidos ao medir o desempenho da combustão de biomassa (cisco de café e casca de arroz) em um reator de leito fluidizado borbulhante. Ao analisar as porcentagens de CO₂, O₂ e CO obtidos nos gases de saída, definiram-se as variáveis que afetam a combustão desta biomassa e também os pontos ótimos de combustão e operação do reator. Sugerem-se alternativas para a utilização e aproveitamento deste tipo de matéria-prima, já que suas características particulares dificultam seu aproveitamento.

Palavras chave

Combustão em leito fluidizado, resíduos industriais, biomassa.

Introducción

El gran consumo de energía proveniente de combustibles fósiles y los efectos ambientales que esto acarrea ha hecho que se mire detenidamente la implementación de tecnologías limpias que usen biomasa como sustituto de estos combustibles en algunos procesos de generación de energía.

Una importante e inagotable fuente de energía renovable se encuentra en los residuos generados por los procesos agroindustriales. La combustión de esta biomasa, además de ser una buena solución para producir energía, contribuye a una significativa reducción de la contaminación, en contraste con la causada por el uso de otros combustibles.

La biomasa se obtiene a partir de residuos generados de la trilla de café y de arroz, lo cual representa una atractiva fuente de energía e ingresos para sus productores. Su bajo contenido de humedad hace que tales residuos sean utilizados eficientemente en sistemas de combustión. La combustión en un *reactor de lecho fluidizado burbujeante* (RLFB) permite transformar la energía química almacenada en estos residuos en energía térmica.

1. Disponibilidad de los recursos

El arroz *paddy* seco y el café verde son ampliamente cultivados en el mundo. En las tablas 1 y 2 se detalla el promedio anual de producción mundial de los últimos años y los porcentajes de cascarilla de arroz y de cisco de café que resultan de la producción de café y de arroz, respectivamente, así como el potencial energético de dichos subproductos. Para ambos casos se estima que la cascarilla y el cisco representan el 20% de la producción (Natarajan *et al.*, 1997; Roa, 1999).

Tabla 1. Promedio anual de la producción y potencial energético de arroz *paddy* seco en el mundo, 2000-2007*

Posición	País	(10 ⁶) kg	% cascarilla (10 ⁶) kg	Potencial energético × 10 ¹⁵ J
1	China	179.949 ± 7.853	36.404 ± 2.368	496 ± 21,70
20	Colombia	2.497 ± 265	499 ± 53	6,9 ± 0,73
33	Venezuela	849 ± 178	169 ± 35	2,34 ± 0,50
Total mundial		610.873 ± 28.476	122.174 ± 5.695	1.686 ± 78,60

* Poder calorífico: 13,8×10⁶ J/kg

Fuente: FAO, s. f.; Natarajan *et al.*, 1997.

Tabla 2. Promedio anual de la producción y potencial energético del café pergamino en el mundo, 2000-2007*

Posición	País	(10 ⁶) kg	% cisco (10 ⁶) kg	Potencial energético × 10 ¹⁵ J
1	Brasil	2.204 ± 294	440 ± 59	7,90 ± 1,13
3	Colombia	671 ± 27	134 ± 5	2,40 ± 0,10
18	Venezuela	74 ± 9	15 ± 2	0,26 ± 0,03
Total mundial		8.243 ± 915	1.648 ± 183	29,56 ± 3,52

* Poder calorífico: 17,93×10⁶ J/kg.

Fuente: FAO, s. f.; Roa, 1999.

Esta biomasa está principalmente concentrada en los molinos de producción. Mediante métodos eficientes de conversión, esta energía puede suplir algunas demandas que se generan en los procesos de producción, como generación de agua caliente, aire caliente, vapor, etc.

En la actualidad una pequeña porción de esta biomasa es utilizada en tareas diferentes a las energéticas: el cisco de café, como abono o la fabricación de briquetas; la cascarilla de arroz, para la fabricación de láminas prensadas o como sustrato para dar humedad en cultivos hidropónicos. Incluso las cenizas de la combustión de esta se usan como aditivo en la fabricación de cemento. No obstante, la baja densidad de estos subproductos dificulta su almacenamiento y transporte y su posterior aprovechamiento.

2. Características químicas de la biomasa

En la Tabla 3 se detalla la composición química por componentes de la biomasa que se va a utilizar. Tal composición es de vital importancia, debido a que de esta dependen algunos de los parámetros que es necesario tener en cuenta para conseguir los puntos óptimos de combustión y funcionamiento del reactor. Las características físicas de estos subproductos hacen que se tengan que utilizar excesos de aire altos durante la combustión, lo cual favorece la fluidización dentro del lecho y, por ende, la combustión de estos es más eficiente.

Tabla 3. Composición química por compuestos (%)

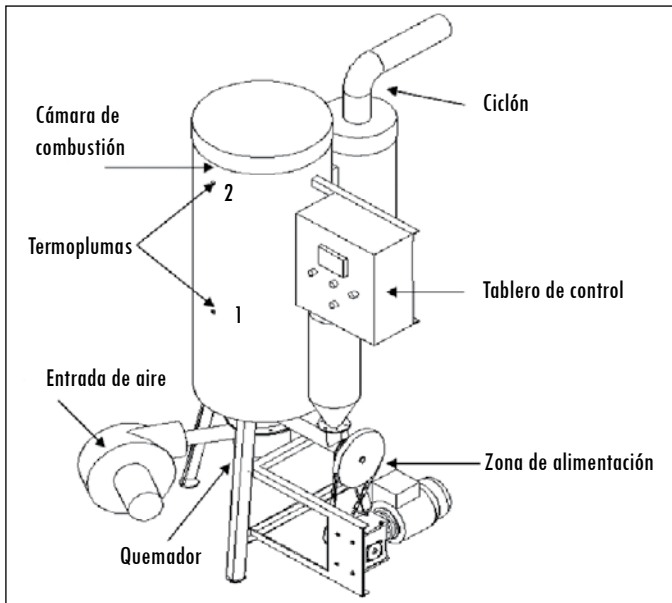
Compuestos	Cascarilla de arroz	Cisco de café
Fibra bruta	34,3-41,6	...
Cenizas	14,2-24,6	0,5-0,6
Proteínas	1,9-6,2	3,2
Grasa	0,4-1,5	...
Celulosa	37,2-43,2	57
Alfa	...	5,5
Beta	...	4,5
Hemicelulosa	17,2-22,2	...
Azúcar	0,2-0,4	...
Lignita	...	20,6-23,15
Extracto de éter	...	3,4

Fuente: Natarajan *et al.*, 1997; Tamayo, 2000.

3. Reactor de lecho fluidizado burbujeante

El RLFB se diseñó y construyó según los datos obtenidos de los estudios realizados por (Natarajan *et al.*, 1997; Barriga, 1996; Permchart y Kouprianov, 2004), en los cuales se detallan las dimensiones y recomendaciones sobre este tipo de aplicaciones. El RLFB consta principalmente de tres zonas: la zona de fluidización, la de alimentación del residuo agroindustrial y una última zona que comprende la cámara de combustión y el ciclón. En la Figura 1 se muestra el RLFB.

Figura 1. Esquema del reactor de lecho fluidizado burbujeante



Fuente: presentación propia de los autores.

3.1 Zona de fluidización

Esta zona se encuentra en la parte inferior del RLFB y está compuesta por un quemador de gas propano industrial de tipo atmosférico, que eleva la temperatura del lecho para dar inicio a la combustión; posteriormente, se ubica un ventilador centrífugo que da el caudal de aire necesario para soportar la combustión en el RLFB, y entre la zona de fluidización y la de alimentación se ubica una malla de acero que le permite al aire entrar al reactor de una forma más homogénea y servir de sostén a la biomasa.

3.2 Zona de alimentación de la biomasa

La zona de alimentación está localizada en medio de la zona de fluidización y la cámara de combustión, con el fin de evitar problemas como la *pirolisis* o la combustión de la biomasa en el canal de alimentación antes de que esta sea alimentada. Un problema que se debe solucionar es la alimentación en el reactor, pues debido a las características físicas de estos residuos, la alimentación no es constante, lo cual dificulta determinar los puntos óptimos de combustión. Por lo tanto, la alimentación en este tipo de aplicaciones se debe hacer forzada, por intermedio de un tornillo sinfín o un sistema neumático.

En este estudio se utilizó un tornillo sinfín que gira a 60 rpm y que brindó los siguientes resultados: para la cascarilla de arroz se consiguió alimentar $1 \pm 0,05 \times 10^{-3}$ kg/s y para el cisco de café $1,76 \pm 0,094 \times 10^{-3}$ kg/s.

3.3 Cámara de combustión

La cámara de combustión diseñada es de tipo cilíndrico, porque la combustión es más eficiente en comparación con las cámaras cuadradas o rectangulares (Natarajan *et al.*, 1997). La cámara tiene un recubrimiento interno de manta cerámica y ladrillo refractario. Cuenta con tres termocuplas tipo K, las cuales se pueden observar en la Figura 1. La primera mide la temperatura en la parte inferior del lecho donde ocurre gran parte de la combustión, la segunda está ubicada en la parte superior y una tercera se encuentra en la salida de los gases de combustión.

Los principales factores que influyen en la eficiencia de la combustión en el RLFB son: la velocidad de fluidización de las partículas, la temperatura de la combustión y la carga de alimentación. En la Figura 2 se puede observar el montaje del reactor en el cual se realizaron las pruebas de combustión.

Figura 2. Reactor de lecho fluidizado burbujeante



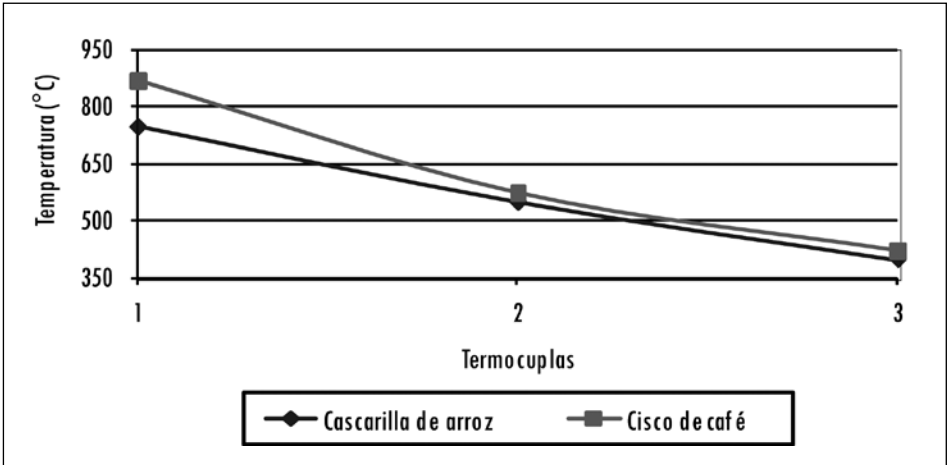
Fuente: presentación propia de los autores.

4. Resultados y discusión

A partir de las mediciones de temperatura y concentraciones de CO_2 , O_2 y CO en los gases de escape se hizo un estudio analítico (Beltrán, 1983; Culp, 1979) en el cual se compararon y se determinaron los puntos donde la combustión es más eficiente y la operación del equipo es la mejor.

Para la cascarilla de arroz se realizaron pruebas de combustión dentro de un rango de temperatura de 700-850 °C (mostró mayor estabilidad a 780 °C) y de 726-1025 °C para el cisco de café (mostró mayor estabilidad a 870 °C). En la Figura 3 se muestra el perfil de temperatura del RLFB para cada tipo de biomasa, según las termocuplas.

Figura 3. Perfil de temperaturas en el RLFB

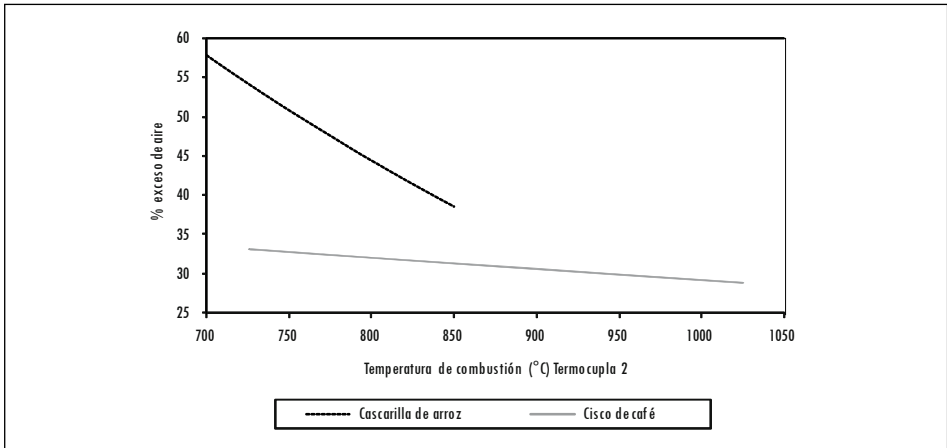


Fuente: presentación propia de los autores.

4.1 Emisiones de gases

En la Figura 4, y a partir de los porcentajes de emisión de O_2 y CO , se hallaron los porcentajes de exceso de aire que se presentaron durante la operación del RLFB para ambos tipos de biomasa (Nogueira, 2003). Son importantes porque con ellos se detallan mejor los puntos donde la combustión de la biomasa es mejor. En la figura se puede observar que el exceso de aire es muy variable para la cascarilla de arroz, en comparación con el cisco de café. Esto se debe a que se presentan problemas de aglutinamiento, que hacen que su alimentación no sea fluida y, por consiguiente, la temperatura de combustión sea variable.

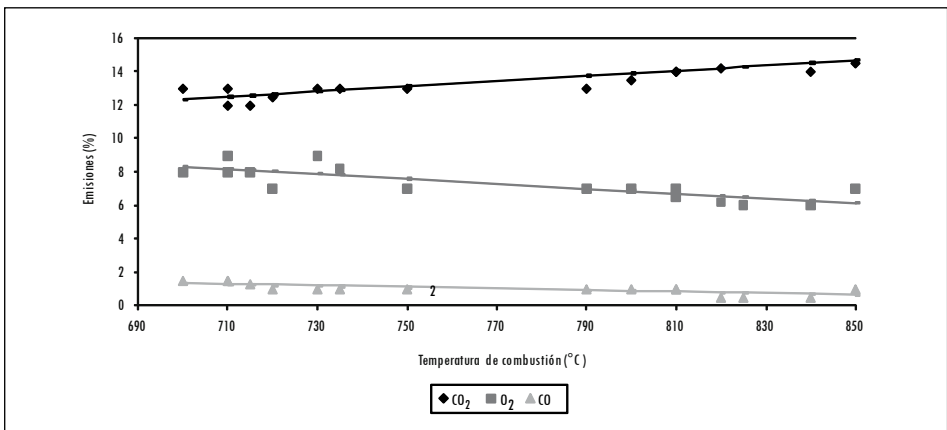
Figura 4. Porcentaje de exceso de aire



Fuente: presentación propia de los autores.

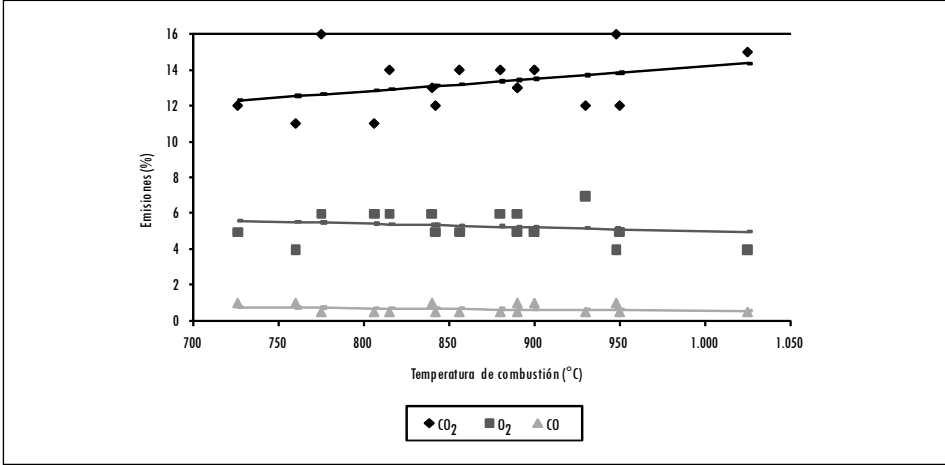
En las figuras 5 y 6 se muestra la composición de los gases a la salida del ciclón para la cascarilla de arroz y el cisno de café, respectivamente. En ellas se puede apreciar muy claramente el efecto de la temperatura y el exceso de aire sobre las emisiones y, por consiguiente, sobre la eficiencia de la combustión. Las figuras muestran claramente cómo la temperatura y la alimentación están claramente relacionadas e influyen en el comportamiento del lecho: al aumentar la temperatura, se observa cómo el CO₂ aumenta y los otros componentes (O₂ y CO) disminuyen sustancialmente; esto indica que la combustión es más eficiente.

Figura 5. Emisión de gases (equipo Orsat) de la cascarilla de arroz



Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 6. Emisión de gases (equipo Orsat) de cisco de café



Fuente: presentación propia de los autores.

4.2 Cenizas

En las tablas 4 y 5 se muestran los resultados que determinan los porcentajes de reducción en peso y en volumen de la biomasa después del proceso de combustión, convertida en ceniza como sale del ciclón y posteriormente compactada, para ambos tipos de biomazas.

Tabla 4. Porcentaje de reducción en peso y volumen para 1,2 kg de cascarilla de arroz

Muestra	Peso ceniza (kg)	% reducción	Volumen (L)	Suelto (L)	Compacto (L)	% reducción suelto	% reducción compacto
1	0,198	83,50	8,36	2,67	1,06	68,06	87,32
2	0,203	83,08	8,45	2,54	1,04	69,94	87,69
3	0,215	82,08	8,10	2,73	1,10	66,30	86,42
4	0,210	82,50	8,27	2,59	1,09	68,68	86,82
5	0,205	82,92			Media	68,25	87,06
	Media	82,82			Desviación	1,31	0,48
	Desviación	0,49					

Fuente: presentación propia de los autores.

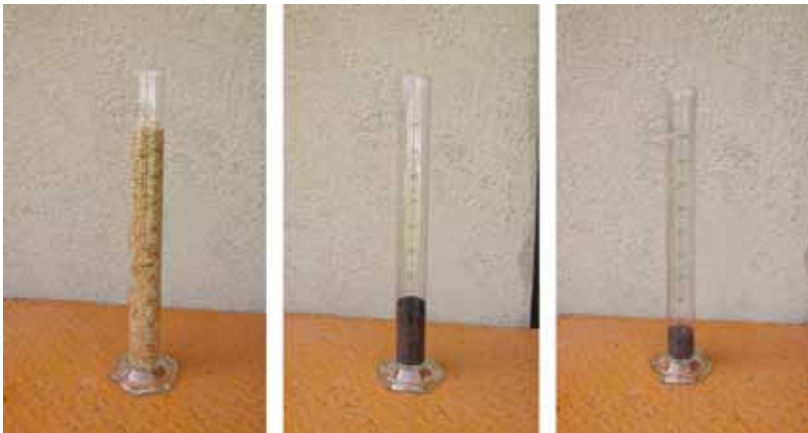
Tabla 5. Porcentaje de reducción en peso y volumen para 1 kg de cisco de café

Muestra	Peso ceniza (kg)	% reducción	Volumen (L)	Suelto (L)	Compacto (L)	% reducción suelto	% reducción compacto
1	0,049	95,10	3,01	0,32	0,17	89,37	94,35
2	0,037	96,30	3,29	0,26	0,14	92,10	95,74
3	0,030	97,00	3,11	0,19	0,08	93,89	97,27
4	0,036	96,40	3,17	0,21	0,12	93,38	96,37
5	0,037	96,30	3,10	0,24	0,10	92,26	96,77
	Media	96,22			Media	92,20	96,10
	Desviación	0,62			Desviación	1,57	1,00

Fuente: presentación propia de los autores.

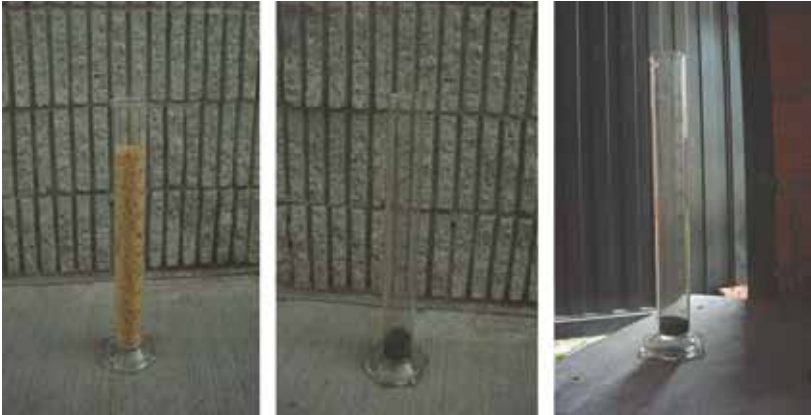
Los porcentajes de reducción de peso son importantes, porque con ellos se hizo el balance de masa del reactor y también el cálculo aproximado de la eficiencia de la combustión. En las figuras 7 y 8 se pueden apreciar con mayor detalle los porcentajes de reducción en volumen para ambos tipos de biomasa.

Figura 7. Porcentaje de reducción en volumen de la cascarilla de arroz



Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 8. Porcentaje de reducción en volumen del cisco de café



Fuente: presentación propia de los autores.

4.3 Eficiencia de la combustión

La eficiencia de la combustión (E_c) se calcula según la ecuación dada por (Armesto *et al.*, 2002):

$$E_c = \left[\frac{(E_f - E_a - E_{fg})}{E_f} \right] * 100$$

Donde:

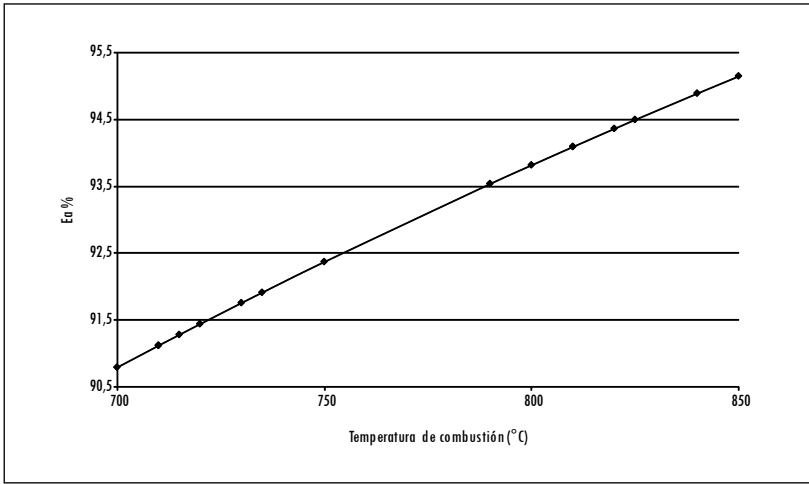
E_f : energía del combustible suministrado.

E_{fg} : energía de los gases.

E_a : energía de las cenizas.

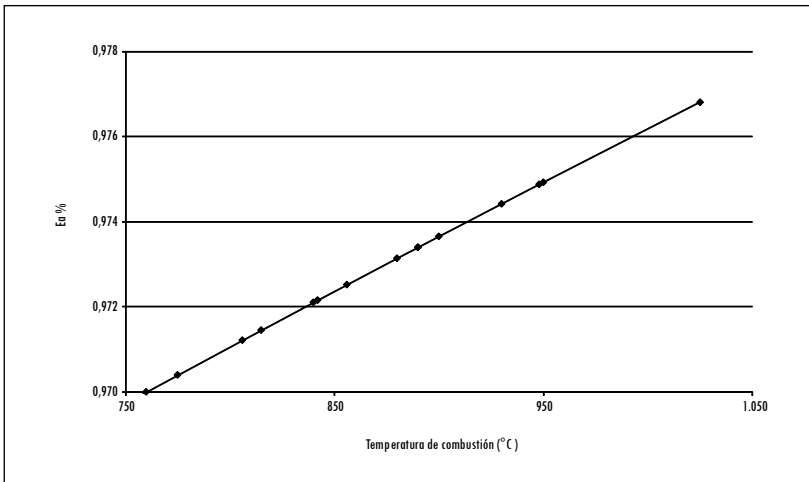
En las figuras 9 y 10 se muestra la eficiencia de la combustión para los dos tipos de biomasa utilizados. De acuerdo con lo expuesto, se establecieron unos puntos óptimos de combustión para cada tipo de biomasa: para la cascarilla de arroz, a una temperatura de 780 °C y un exceso de aire del 46%, la eficiencia de la combustión es de aproximadamente el 93,5%, y para el cisco de café, a una temperatura de 870 °C y un exceso de aire del 31%, la eficiencia es de aproximadamente el 97,3%. Estas eficiencias son excelentes y comparables a las obtenidas en otros estudios referentes al tema.

Figura 9. Eficiencia de la combustión de la cascarilla de arroz



Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 10. Eficiencia de la combustión del cisco de café



Fuente: presentación propia de los autores.

4.4 Emisión de material particulado

En la Figura 11 se observa el equipo de mediciones de material particulado, el cual se encuentra todavía en etapa de desarrollo. En la Figura 12 se pueden observar algunas de las muestras que se tomaron; por lo tanto, se presentan únicamente los resultados más significativos. Para el cisco de café, la emisión de

material particulado fue de $243,7 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^3$ y para la cascarilla de arroz fue de $418,7 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^3$. Estos datos no son alentadores, ya que la norma fija la emisión de material particulado para fuentes fijas en $0,15 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^3$ (Ministerio del Medio Ambiente de Colombia, 2006).

Figura 11. Proceso de medición



Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 12. Muestras recolectadas



Fuente: presentación propia de los autores.

5. Conclusiones

Este artículo presenta una forma adecuada para el manejo de los residuos agroindustriales y para el aprovechamiento de la energía almacenada en ellos. Las pruebas realizadas brindaron la información necesaria para una implementación comercial de este tipo de tecnología, siempre y cuando se mejoren los problemas que se presentaron con la alimentación y la emisión de particulados.

Para mantener la eficiencia del RLFB y de la combustión es importante que haya una alimentación constante, que permita tener una relación aire-combustible adecuada. En este caso, la alimentación se puede mejorar poniendo un agitador que impida el aglutinamiento de la biomasa.

La disponibilidad del recurso energético (biomasa) a muy bajo costo en los molinos y en las fincas cafeteras permite implementar esta tecnología y, así, disminuir los costos de producción. Al analizar los resultados obtenidos en las pruebas de particulados, es recomendable rediseñar el ciclón o utilizar otro tipo de filtro que garantice que el material particulado emitido al ambiente no sobrepase los límites establecidos. Al analizar los datos de eficiencia de la combustión se puede decir que esta es alta y aceptable para este tipo de aplicaciones.

Referencias

- ARMESTO, L. *et al.* Combustion behavior of rice husk in a bubbling fluidized bed. *Biomass and Bioenergy*, 2002, vol. 23, núm. 3, pp. 171-179.
- BARRIGA, M. B. *Construcción de un gasificador en lecho fluidizado de cascarilla de arroz*. Bogotá: Universidad de los Andes, 1996.
- BELTRÁN, R. Combustión de desechos agroindustriales en lechos fluidizados. *Colombia Ciencia y Tecnología*, 1983, vol. 1, núm. 2, 1983. ISSN: 0120-5595
- CULP, A. W. *Principles of energy conversion*. New York: McGraw-Hill, 1979.
- MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE DE COLOMBIA. Resolución 601 de 2006, por la cual se establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia [documento en línea]. *Diario Oficial*, núm. 46.232. <<http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=19983>>. [Consulta: 28-09-2009].
- NATARAJAN, E.; NORDIN, A. y RAO, N. Overview of combustion and gasification of rice husk in fluidized bed reactor. *Biomass and Bioenergy*, 1998, vol. 14, núm. 5, pp. 533-546.
- NOGUEIRA, L. *Dendroenergía: fundamentos e aplicações*. 2ª ed. Río de Janeiro: Interciência, 2003.
- ORGANIZACIÓN DE LA NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN (FAO). Estadísticas [web en línea]. <<http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>> [Consulta: 16-01-2009].

PERMCHART, W. y KOUPRIANOV, V. I. Emission performance and combustion efficiency of a conical fluidized-bed combustor firing various biomass fuel. *Bioresource Technology*, 2004, vol. 92, núm 1, pp. 83-91.

ROA, M. G. *Beneficio ecológico del café*. Chinchiná: Cenicafé, 1999.

TAMAYO, J. P. *Ensayo de fluidización de cascarilla de arroz y cisco de café en un lecho de partículas de aluminio*. Bogotá: Universidad de los Andes, 2000.