



FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECÁNICA  
DE LAS  
INGENIERÍAS

**FoDAMI**



**II CAIM 2010**  
**Segundo Congreso Argentino**  
**de Ingeniería Mecánica**  
**San Juan - Noviembre 2010**

## **PREDICCIÓN DEL RENDIMIENTO ENERGÉTICO DE GASIFICADORES DE CASCARILLA DE ARROZ EN LECHO FLUIDIZADO PARA SISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA.**

Jorge M. Mendoza Fandiño, Antonio J Bula Silvera<sup>(1)</sup>, Lesmes A Corredor M<sup>(1)</sup>

**Grupo de Investigación: optimización de procesos y uso racional de la energía y biomasa (OPUREB)**

**Facultad de Ingeniería Mecánica**

**Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Montería**

**Km 8 Vía Cereté-Montería-Colombia**

Tel: +57-47860146 ext.150 - E-mail: [jorge.mendoza@upbmonteria.edu.co](mailto:jorge.mendoza@upbmonteria.edu.co)

(1)Grupo de Investigación: *Uso Racional de la Energía y Preservación del medio ambiente (UREMA)* Facultad de Ingeniería Mecánica

Universidad del Norte

Km 5 Vía Puerto Colombia-Barranquilla-Colombia

Tel: +57-53509229 - E-mail: [abula@uninorte.edu.co](mailto:abula@uninorte.edu.co), [icorredo@uninorte.edu.co](mailto:icorredo@uninorte.edu.co)

### **RESUMEN**

Resumen. La agroindustria del arroz es un área importante de la producción en Colombia, que representa 1,8% de la producción nacional y el 6,8% de la industria alimentaria del país, generando casi 4.500 empleos directos por año. Según los datos facilitados por Fedearroz, la producción de arroz es de casi 1,8 millones de toneladas por año. Teniendo en cuenta que la cantidad de cascarilla de arroz aproximadamente es el 25% del peso total del grano, la generación de residuos por año es de 450 mil toneladas, puesto que la densidad de la cáscara de arroz es de 0,1 ton/m<sup>3</sup>, el volumen correspondiente de los residuos sólidos por año es significativo la cantidad de 4,50 millones de metros cúbicos. Este trabajo pretende evaluar el desempeño de un Gasificador de cascarilla de arroz en lecho fluidizado a escala piloto con el fin de contribuir a resolver el problema de la acumulación de residuos sólidos agrícolas, consolidando el uso de combustibles renovables y tecnologías limpias variando algunos parámetros de proceso en aras de obtener mejores eficiencias.

**Palabras claves:** biomasa, cascarilla de arroz, gasificación en lecho fluidizado, combustión y energía renovable.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad mundial existe un gran interés por el uso de combustibles alternativos para la generación de energía, el decremento de los combustibles fósiles y sus elevados costos hacen necesaria la adopción de nuevas tecnologías que aseguren un desarrollo sostenible a la economía, al ambiente y la sociedad, para aprovechar las casi 461 mil toneladas año de biomasa, como los residuos del arroz, que actualmente constituyen un problema serio de disposición final de residuos sólidos; es por esto que surge el interés por el aprovechamiento energético de este recurso renovable[1].

La gasificación de la cascarilla de arroz en lecho fluidizado constituye una de las opciones más promisorias, ya que además de posibilitar el aprovechamiento de calor en forma directa (p.e. en la producción de vapor), representa una tecnología limpia que proporciona un gas combustible con el poder calorífico necesario para alimentar motores de combustión interna y transmitir potencia mecánica de rotación (útil en diversas aplicaciones industriales), o en otro caso, para generar electricidad mediante el acople de turbinas a gas o vapor. Sin embargo, aunque los beneficios de esta alternativa han sido extensamente divulgados en otros países, en Colombia, los adelantos realizados a nivel de laboratorio no han contado con la continuidad ni el desarrollo suficiente para materializar el esfuerzo científico iniciado hace ya algunos años; por lo tanto, el presente artículo busca evaluar energéticamente un gasificador de cascarilla de arroz en lecho fluidizado a escala piloto, con el fin de contribuir a la solución del problema ocasionado por la acumulación de residuos sólidos agrícolas, a la consolidación del aprovechamiento energético de combustibles de carácter renovable y a la implementación definitiva de una tecnología limpia que seguramente proporcionará mejoras en la eficiencia de los procesos subsiguientes.

## 2. EL ARROZ EN COLOMBIA

La agroindustria molinera de arroz en Colombia es un sector importante para el país en la medida en que representa el 1,8% de la producción manufacturera nacional y el 6,8% de la industria alimentaria del país, generando alrededor de 4.500 empleos directos al año [2]. Es una industria que tiene una fuerte integración vertical con los agricultores, absorbiendo la totalidad de la cosecha nacional de arroz paddy y realizando importaciones esporádicas de materia prima normalmente procedente de los Estados Unidos. Al año 2006, según Fedearroz, la producción de arroz era del orden de 1,8 millones de toneladas; si se considera que la cascarilla de arroz representa aproximadamente el 25% del peso total del grano, la generación del residuo agrícola para este mismo periodo correspondió a aproximadamente 461 mil toneladas; debido a que el promedio de la densidad a granel de la cascarilla de arroz es de  $0,1 \text{ ton/m}^3$ , el volumen del residuo sólido en el año alcanzó entonces una cantidad cercana a 4,61 millones de metros cúbicos. Aunque una parte de este volumen de cascarilla de arroz es utilizado en galpones, cultivos de flores y secado de granos en hornos, otra gran parte aún constituye un problema serio de disposición final de residuos sólidos en molinos o trilladoras, a pesar de que éstas consiguen vender una proporción a bajos precios u ofrecerla de forma gratuita a quien pueda darle un uso racional.

## 2.1. La cascarilla de arroz

La figura 1 muestra el diagrama de proceso de obtención del arroz blanco, incluido sus co-productos y residuos.

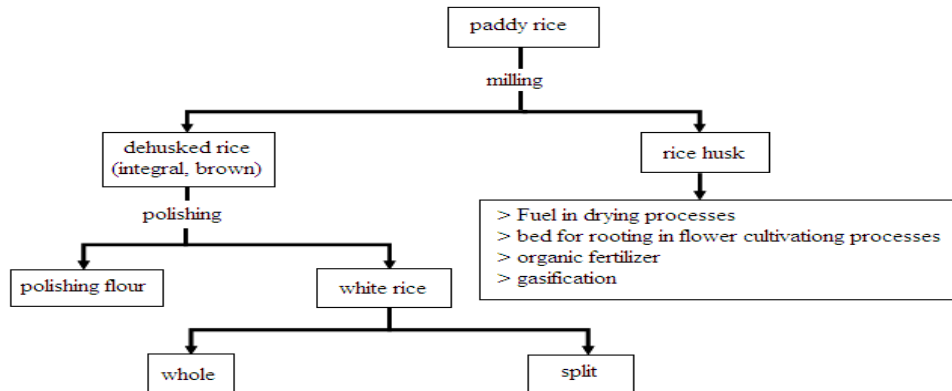


Figura 1. La estructura de la cadena del arroz en Colombia [2]

## 2.2. Caracterización fisicoquímica de la cascarilla de arroz

La cascarilla de arroz, como cualquier otro integrante del grupo de las biomásas de tipo vegetal, está constituida por materia orgánica que tuvo origen inmediato en un proceso biológico por vía fotosintética. Este residuo agrícola puede emplearse como combustible debido a la presencia de moléculas celulósicas que contienen energía en sus enlaces y que se libera bajo condiciones de oxidación total o parcial (Tabla. 1).

Tabla 1. Composición química de la cascarilla de arroz y sus cenizas [11]

Composición de la cascarilla de arroz en base seca		Composición de las cenizas de la cascarilla de arroz en base seca	
Elemento	Fracción másica (%)	Elemento	Fracción másica (%)
Carbono	41,440	Sílice (SiO <sub>2</sub> )	80 - 90
Hidrogeno	4,940	Alúmina	1 - 2,5
Oxigeno	37,320	Oxido férrico	0,5
Nitrógeno	0,570	Dióxido de titanio	nil
Silicio	14,660	Oxido de calcio	1 - 2
Potasio	0,590	Oxido de magnesio	0,5 - 2,0
Sodio	0,035	Oxido de sodio	0,2 - 0,5
Azufre	0,300	Potasio	0,2
Fosforo	0,070	Pérdida por ignición	10 - 20
Calcio	0,060		
Hierro	0,006		
Magnesio	0,003		

Tabla 2. Análisis elemental e inmediato de la cascarilla de arroz [3]

Análisis inmediato		Análisis elemental	
Volátiles (%)	65,47	Carbono (%)	40,96
Cenizas (%)	17,89	Hidrogeno (%)	4,3
Carbono fijo (%)	16,67	Oxigeno (%)	35,86
Poder calorífico superior (MJ/kg)	16,14	Nitrógeno (%)	0,4
Densidad Aparente (kg/m <sup>3</sup> )	650	Azufre (%)	0,02
Tamaño (mm)	5-11	Cenizas (%)	18,34
Dureza (Mohs)	6		
Temperatura de fusión de cenizas (°C)	1460		
Humedad (%)	8,0-14,6		

La tabla 2 muestra los valores promedio del análisis Elemental e Inmediato de la cascarilla de arroz más relevante para la utilización de estos como combustible. Los datos reportados indican que este residuo agrícola presenta grandes posibilidades para ser aprovechado energéticamente, hecho que se corrobora con la existencia de diversos equipos térmicos industriales operando, donde la energía contenida del residuo se transfiere de manera controlada a otros procesos, específicamente, a aquellos que involucran el secado de materiales, la generación de electricidad y la producción de gas combustible.

### 3. GASIFICACIÓN DE BIOMASA

#### 3.1. Procesos de transformación de la biomasa para su aprovechamiento energético

La conversión de la biomasa se puede realizar por dos vías básicamente: la conversión por métodos biológicos (Figura 2a), los cuales se basan en la descomposición de la biomasa mediante el uso de microorganismos con la presencia o ausencia de oxígeno, en este caso la fermentación alcohólica y la digestión anaerobia.

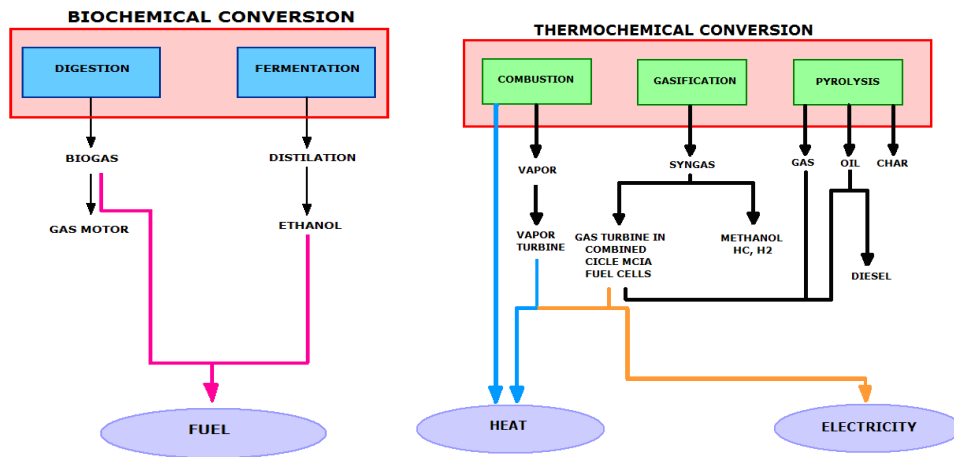


Figura 2. a) Conversión bioquímica de la biomasa, b) Conversión termoquímica de la biomasa [4]

Por otro lado, está el procesamiento termoquímico de la biomasa lignocelulósica que se basan en la combustión directa, pirólisis o gasificación, de los cuales sus productos principales pueden ser gas, líquido, carbón vegetal y/o energía térmica (Figura 2b), dependiendo de la tecnología empleada.

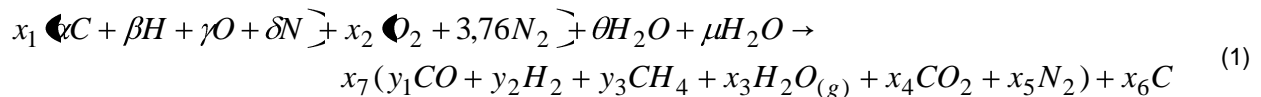
La gasificación de la biomasa puede definirse como el proceso mediante el cual la biomasa es degradada por reacciones térmicas en presencia de cantidades limitadas de agente oxidante (oxidación parcial-pirólisis), para generar un producto gaseoso combustible compuesto principalmente por hidrógeno, monóxido de carbono, metano, dióxido de carbono, vapor de agua, nitrógeno y trazas de hidrocarburos pesados (alquitranes) [4,5]. El agente gasificante es usualmente aire, aunque también hay otros procedimientos que utilizan vapor de agua, dióxido de carbono o una mezcla de éstos, controlando el proceso con el objetivo de maximizar la producción de hidrógeno y monóxido de carbono. Es preferible que la biomasa a gasificar esté seca y fragmentada con el objetivo de maximizar el rendimiento del proceso.

De otro lado, y a pesar de que la combustión de la cascarilla de arroz actualmente representa grandes beneficios en la producción de calor para el proceso de secado, en los últimos años la gasificación de biomasa vegetal se ha venido convirtiendo en una importante alternativa para países del tercer mundo que

dependen de combustibles fósiles como el carbón y el petróleo. Definida como la conversión de un combustible sólido a gas energético ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  y  $\text{CH}_4$ ) mediante la oxidación parcial a elevadas temperaturas, la gasificación representa una de las tecnologías más prometedoras a futuro. El gas energético se produce de manera controlada en un reactor donde el combustible sólido sufre transformaciones físicas y químicas que involucran etapas como el secado, la devolatilización, la combustión y la gasificación propiamente dicha, donde el poder calorífico del gas varía dependiendo del procedimiento adoptado en el proceso; si el agente gasificante es aire, tendrá un valor de 4-6  $\text{MJ/m}^3\text{N}$ ; si el proceso se realiza con oxígeno estaría entre 10-20  $\text{MJ/m}^3\text{N}$ , y si se gasifica con hidrógeno  $>30 \text{ MJ/m}^3\text{N}$  [6]. El contenido energético del gas también se ve afectado por la composición de la biomasa, cuyo valor energético de un combustible sólido particular, depende de las propiedades químicas y físicas de las moléculas que lo constituyen.

#### 4. ANÁLISIS ENERGÉTICO GLOBAL DEL GASIFICADOR

De acuerdo a la composición química de la cascarilla de arroz, se pueden obtener otros productos, tales como el dióxido de carbono, vapor de agua y nitrógeno; estas propiedades se muestran a continuación en la ecuación. (1), esta composición es obtenida por medio del análisis elemental de la biomasa:



##### 4.1. Balance de masa

Básicamente este consiste en determinar los flujos máscicos de combustible, aire y gas energético en el gasificador (Figura 3) que se desarrolla desde la ecuación (2) a la (12).

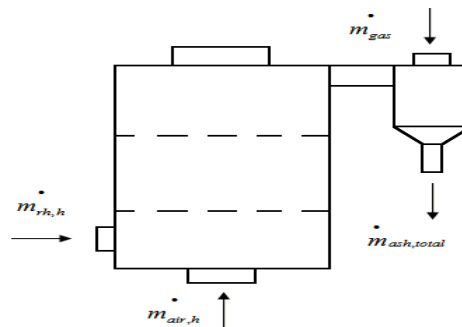


Figura 3. Balance de masa en el gasificador

**PRIMER PASO.** Formulación para la determinación del flujo máscico de combustible (cascarilla de arroz) alimentado en base húmeda y seca, la composición molar de la cascarilla de arroz tomada de Tabla 2 se estima para 100g en base seca.

$$\dot{m}_{rh,d} = 100 \cdot x_1 \quad (2)$$

$$\dot{m}_{rh,h} = \dot{m}_{rh,d} - rh_{rh} \cdot x_1 \quad (3)$$

$$\theta = \frac{rh_{rh} \cdot x_1}{MW_{H_2O}} \quad (4)$$

**SEGUNDO PASO.** Formulación para la determinación de flujo másico de aire alimentado al gasificador en base seca y húmeda.

$$\dot{m}_{air,d} = n_{air} \cdot MW_{air} \cdot x_2 \quad (5)$$

$$\dot{m}_{air,h} = \dot{m}_{air,d} - \dot{m}_{air,d} \cdot \omega \quad (6)$$

$$\mu = \frac{\omega \cdot \dot{m}_{air,d}}{MW_{H_2O}} \quad (7)$$

**TERCER PASO.** Determinación de la fracción molar de aire ( $x_2$ ), según las condiciones de fluidización y las dimensiones del reactor empleado.

$$x_2 = \frac{U_{mf} \cdot \pi D_R^2 \cdot P_R}{4R_{air} \cdot T_R \cdot MW_{air} \cdot n_{air}} \times 100 \quad (8)$$

**CUARTO PASO.** Determinación del flujo másico de cenizas totales salientes del gasificador.

$$\dot{m}_{ash,total} = \dot{m}_{ash,parcial} + \dot{m}_{rc} \quad (9)$$

$$\dot{m}_{ash,parcial} = \frac{ash}{100} \cdot \dot{m}_{rh,d} \quad (10)$$

$$\dot{m}_{rc} = \frac{rc}{100} \cdot \dot{m}_{ash,total} \quad (11)$$

**QUINTO PASO.** Determinación del flujo másico del gas producido.

$$\dot{m}_{gas} = \dot{m}_{rh,h} + \dot{m}_{air,h} - \dot{m}_{ash,total} \quad (12)$$

## 4.2. Balance de energía

Por medio de este se busca obtener la distribución de la energía en el proceso de gasificación que se desarrolla mediante las ecuaciones (13) a la (25). Adicionalmente, la eficiencia en caliente y frío del equipo, para el factor de aire (FA) determinado para las condiciones de operación (Figura 4) se nota en las ecuaciones (26) a la (30).

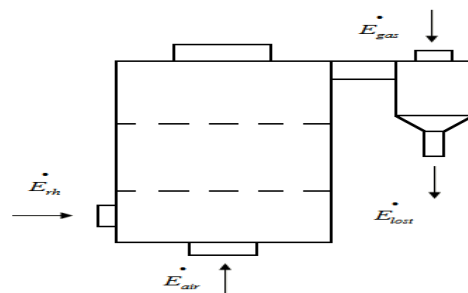


Figura 4. Balance de energía en el gasificador

**PRIMER PASO.** Formulación para la determinación del flujo energético para el combustible (cascarilla de arroz) alimentado en base húmeda y seca.

$$\dot{E}_{rh} = \dot{m}_{rh,d} \cdot LHV_{rh} \quad (13)$$

**SEGUNDO PASO.** Formulación para la determinación del flujo energético del aire alimentado al gasificador, para las condiciones de fluidización.

$$\dot{E}_{air} = \dot{m}_{air,d} \cdot C_{p,air} (T_{air} - T_{ref}) \quad (14)$$

**TERCER PASO.** Formulación para la determinación del flujo energético del gas producido bajo las condiciones de operación:

$$\dot{E}_{gas} = \dot{E}_{chemical,gas} + \dot{E}_{sensible,gas} \quad (15)$$

$$\dot{E}_{chemical,gas} \quad (16)$$

$$= \frac{\dot{m}_{gas}}{y_1 \cdot MW_{CO} + y_2 \cdot MW_{H_2} + y_3 \cdot MW_{CH_4} + x_3 \cdot MW_{H_2O} + x_4 \cdot MW_{CO_2} + x_5 \cdot MW_{N_2}} \cdot LHV_{gas}$$

$$LHV_{gas} = y_1 \cdot LHV_{CO} + y_2 \cdot LHV_{H_2} + y_3 \cdot LHV_{CH_4} \quad (17)$$

$$CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2 \quad (18)$$

$$LHV_{CO} = y_1 \left[ \left( n_{CO} \cdot h_{f,CO} \right) + \left( n_{O_2} \cdot h_{f,O_2} \right) - \left( n_{CO_2} \cdot h_{f,CO_2} \right) \right] \quad (19)$$

$$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O \quad (20)$$

$$LHV_{H_2} = y_2 \left[ \left( n_{H_2} \cdot h_{f,H_2} \right) + \left( n_{O_2} \cdot h_{f,O_2} \right) - \left( n_{H_2O} \cdot h_{f,H_2O} \right) \right] \quad (21)$$

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O \quad (22)$$

$$LHV_{CH_4} = y_3 \left[ \left( n_{CH_4} \cdot h_{f,CH_4} \right) + \left( n_{O_2} \cdot h_{f,O_2} \right) - \left( n_{CO_2} \cdot h_{f,CO_2} \right) - \left( n_{H_2O} \cdot h_{f,H_2O} \right) \right] \quad (23)$$

$$\dot{E}_{sensible,gas} = \left[ \frac{\dot{m}_{gas}}{y_1 \cdot MW_{CO} + y_2 \cdot MW_{H_2} + y_3 \cdot MW_{CH_4} + x_3 \cdot MW_{H_2O} + x_4 \cdot MW_{CO_2} + x_5 \cdot MW_{N_2}} \right] \times$$

$$\left[ y_1 \int_{T_{ref}}^{T_R} (7.6 + 0.005T) dT + y_2 \int_{T_{ref}}^{T_R} (7.7 + 0.0034T) dT + y_3 \int_{T_{ref}}^{T_R} (2.4 + 0.048T) dT + \right. \quad (24)$$

$$x_3 \int_{T_{ref}}^{T_R} (4.4 + 0.00063T + 0.0000056T^2) dT + x_4 \int_{T_{ref}}^{T_R} (3.3 + 0.0115T - 818519.4T^{-2}) dT +$$

$$x_5 \int_{T_{ref}}^{T_R} (7.2 + 0.0041T) dT \quad \left. \right]$$

**CUARTO PASO.** Formulación para la determinación de las pérdidas de energía en el proceso según las condiciones de operación.

$$\dot{E}_{lost} = \dot{E}_{rh} + \dot{E}_{air} - \dot{E}_{gas} \quad (25)$$

#### 4.3. Desempeño del gasificador y su factor de aire

Finalmente se determinan la eficiencia en frío y caliente y el factor de aire.

$$AF = \frac{R_{air / rh,real}}{R_{air / rh,stequiometric}} \quad (26)$$

$$R_{air / rh,stequiometric} = 0.0889(C + 0.375S) + 0.265H - 0.033O \quad (27)$$

$$R_{air / rh,real} = \frac{U_{mf} \cdot \pi D_R^2 \cdot T_{normal}}{T_R \cdot m_{rh,d}} \quad (28)$$

$$\eta_c = \frac{\dot{E}_{chemical,gas}}{\dot{E}_{rh}} \times 100 \quad (29)$$

$$\eta_h = \frac{\dot{E}_{chemical,gas} + \dot{E}_{sensible,gas}}{\dot{E}_{rh}} \times 100 \quad (30)$$

## 5. COMPARACIÓN DE LAS CONDICIONES DE PROCESO EXPERIMENTAL

A partir de una revisión bibliográfica, encaminada a comparar experimentalmente los resultados obtenidos por diferentes autores, determinando los parámetros operacionales a modelar buscando el mejor desempeño energético de gasificadores en lecho fluidizado, alimentado con cascarilla de arroz (Tabla 3):

Los parámetros para el modelo desarrollado se encuentran en la Tabla 3; parámetros de 10 a 12 fueron asumidos según la bibliografía revisada y autores citados.

Tabla 3. Comparación de los parámetros operacionales de la gasificación de la cascarilla de arroz.

Ítem	Parámetro	Ramírez <i>et al.</i> (2007) [7]	<sup>(1)</sup> Kirubakaran <i>et al.</i> [8] (2004) & Fernandes <i>et al.</i> (2007) [9]	(modelo desarrollado EES) <sup>(2)</sup>
1	C (%)	36.6	38.9	40.96
2	H (%)	5.83	5.1	4.3
3	N (%)	3.31	0.6	0.4
4	O (%)	36.65	32	35.86
5	Ash (%)	17.6	23.5	18.34
6	LHV <sub>rh</sub> (kJ/kg)	13559	14139	15552
7	CO (%)	12	15.11	20
8	H <sub>2</sub> (%)	4	5.72	10
9	CH <sub>4</sub> (%)	3	3.7	4
10	U <sub>mf</sub> (m/s)	0.7	0.75	0.725
11	D <sub>R</sub> (m)	0.3	0.4	0.15
12	T <sub>R</sub> (°C)	750	873	812
13	η <sub>c</sub> (%)	<b>60</b>	<b>65.94</b>	<b>67,57</b>
14	<b>AF</b>	<b>0.5</b>	<b>0.410</b>	<b>0,282</b>
15	<b>LHV<sub>gas</sub> (kJ/kmol)</b>	<b>67702</b>	<b>86279</b>	<b>112874</b>

<sup>(1)</sup>: Parámetros del 1 al 6 son de Kirubakaran, los otros restantes de Fernandes.

<sup>(2)</sup>: CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> de Ankur [10], los otros se asumen.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para los parámetros previamente establecidos en el modelo desarrollado, se muestran los resultados en las figuras 5 a la 8.

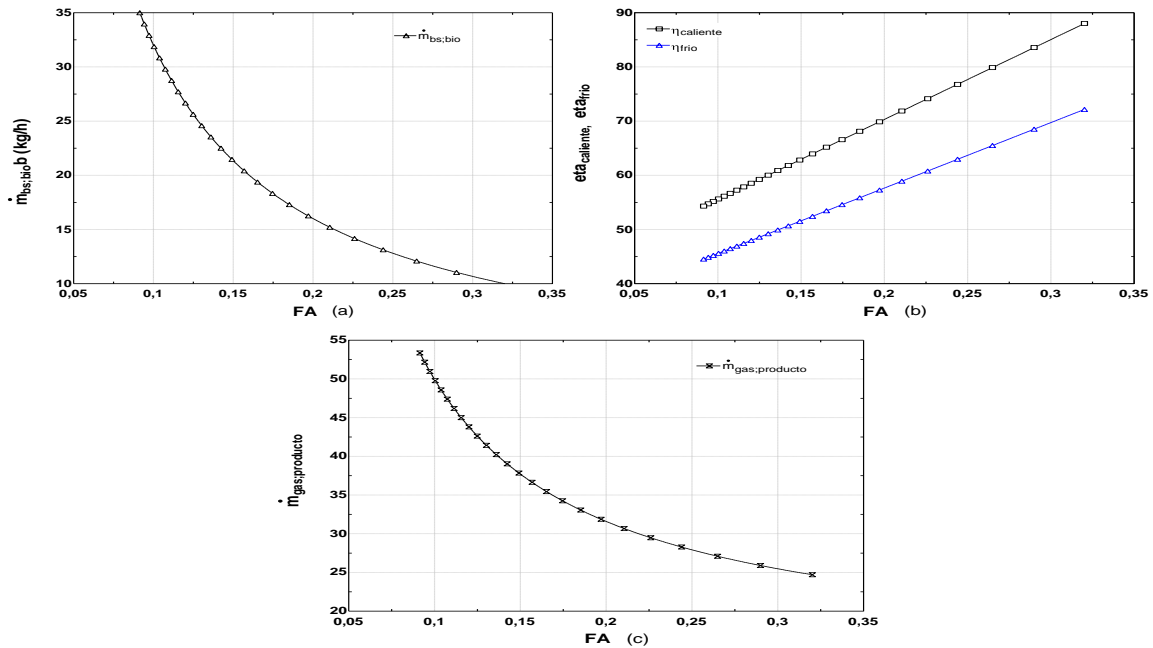


Figura 5. Efecto del Factor de aire en la biomasa de cascarilla alimentada (a), la eficiencia en frío y caliente (b) y el flujo de gas producido (c) para concentraciones de 20% CO, 10% H<sub>2</sub> and 4% CH<sub>4</sub>

En la figura 5 se muestra el efecto del factor de aire. A medida que disminuye el factor de aire, aumenta la energía de biomasa, las eficiencias se reducen en frío y caliente, adicionalmente y el caudal másico de gas que sale aumenta, esto se debe a que menos biomasa se quema y genera un alto contenido de energía de gas y reduce el calor liberado.

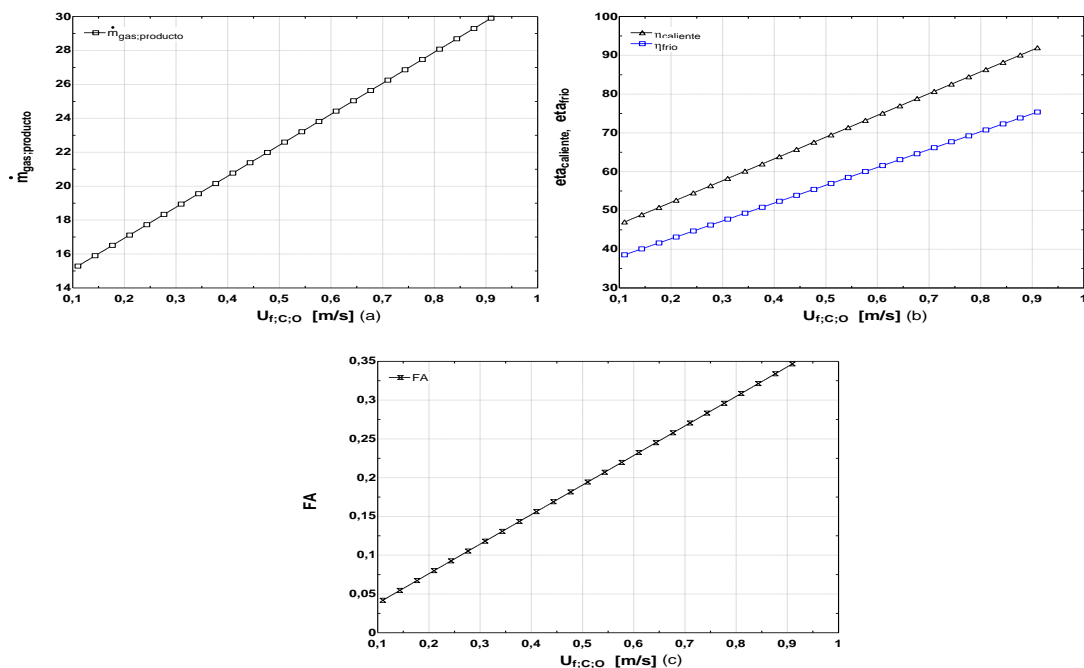


Figura 6. Efecto de la velocidad de fluidización en el flujo de gas producido (a), las eficiencias en frío y caliente (b) y el factor de aire (c) para concentraciones de 20% CO, 10% H<sub>2</sub>, 4% CH<sub>4</sub> y un flujo de cascarilla alimentada de 11.59 kg/h.

El efecto de aumentar la velocidad de fluidización en el gasificador es presentado en la figura 6. El aumento de la velocidad es similar a aumentar el factor de aire, debido a que las condiciones del aire en la entrada y el diámetro en el reactor son constante, generando como resultado que las eficiencias en frío y caliente, la

cantidad de cascarilla de arroz y la temperatura aumenten. El incremento en la velocidad de fluidización cambia las condiciones internas del reactor, desplazando la zona de reacción y provocando una disminución del contenido de energía a medida que la biomasa se quema.

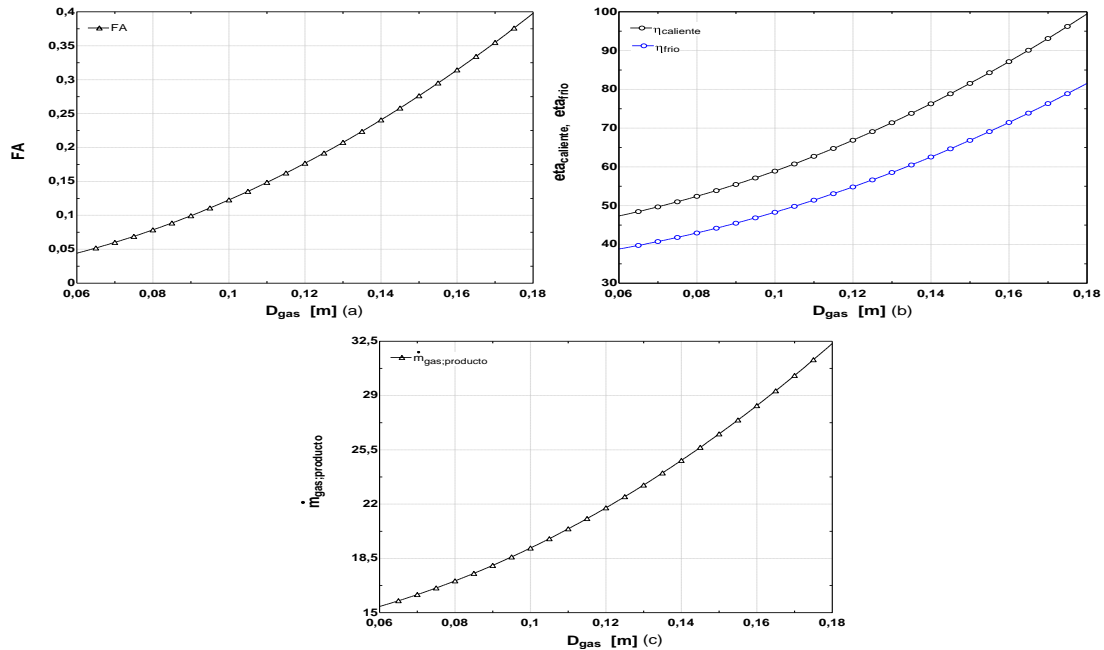


Figura 7. Efecto del diámetro del reactor en el factor de aire (a), las eficiencias en frío y caliente (b) y el flujo de gas producido (c) para concentraciones de 20% CO, 10% H<sub>2</sub>, 4% CH<sub>4</sub> y un flujo de cascarilla de arroz de 11.59 kg/h.

La Figura 7 presenta el efecto de aumentar el diámetro del gasificador. A medida que la velocidad y la alimentación de la biomasa se mantienen constantes, ocasionando aumentos en el factor de aire, las eficiencias en frío y caliente, como también en el flujo del gas producido.

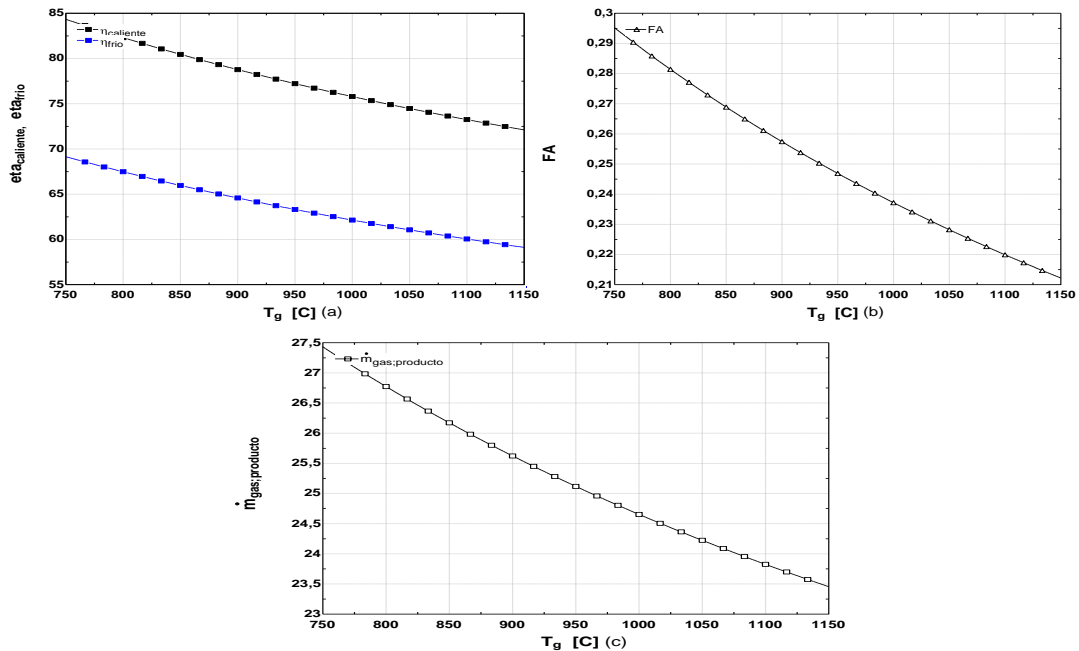


Figura 8. Efecto de la temperatura del reactor con las eficiencias en frío y caliente (a), el factor de aire (b) y el flujo de gas producido (c) para concentraciones de 20% CO, 10% H<sub>2</sub>, 4% CH<sub>4</sub> y un flujo de cascarilla de arroz de 11.59 kg/h.

En la figura. 8 se observa que a medida que disminuye la temperatura de gasificación, el caudal de gas producido, el factor de aire y las eficiencias en frío y caliente incrementan.

### 3. CONCLUSIONES

La gasificación de biomasa constituye una alternativa promisoriosa de generación de energía limpia y de gran interés en países tropicales como Colombia, en donde se cuenta actualmente con una disponibilidad de 1,8 millones de toneladas por año de biomasa residual de la molinería de arroz.

Los cuatro parámetros que influyen en la composición final del gas son: temperatura de gasificación, factor de aire, Velocidad de mínima fluidización, composición del agente gasificante y del combustible. Adicionalmente los parámetros como tamaño de partícula, radio medio de poro, etc, influyen sobre la extensión de las reacciones heterogéneas de gasificación, pero no ejercen influencia en la composición final del gas, siempre que el gasificador tenga la longitud suficiente para permitir que se completen las reacciones heterogéneas.

Un modelo matemático fue desarrollado para predecir los resultados que forma el proceso de gasificación de cascarilla de arroz. La simulación muestra cómo los parámetros afectan al proceso, y con el fin de alcanzar una buena calidad del gas producido (Alto contenido energético), algunos parámetros se mantendrán a ciertos valores. En este caso, se muestra que el factor de aire en la gasificación debe mantenerse entre 0,2 y 0,3.

### 4. AGRADECIMIENTOS

A Colciencias y la Universidad del Norte por el apoyo en la financiación de la tesis doctoral "Estudio y Caracterización teórico-experimental del proceso de gasificación de los residuos de la palma africana en lecho fluidizado. Desarrollo del Modelo matemático de la fenomenología del proceso Validación Experimental con gasificador en lecho fluidizado", respaldado con el Contrato 439-2007.

### 5. REFERENCIAS

- [1] Fedearroz. >[http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/ena/Bolet\\_Arroz\\_Isem06.pdf](http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/ena/Bolet_Arroz_Isem06.pdf)<
- [2] Agrocadenas. [http://www.agrocadenas.gov.co/documentos/anuario2005/Capitulo8\\_Algodon.pdf](http://www.agrocadenas.gov.co/documentos/anuario2005/Capitulo8_Algodon.pdf)
- [3] Jenkins, B. "Fuel Properties for Biomass Materials". In: International Symposium on Energy in Agriculture - The Role of Biomass Fuels. New Delhi. May, p. 21-23, 1990.
- [4] G. Aranda A. "Efecto De Las Condiciones De Operación De Un Gasificador De Lecho Arrastrado Sobre La Composición Del Gas Resultante De Gasificación De Biomasa". Universidad de Castilla La Mancha, 2008.
- [5] J.F. Pérez. "Modelado unidimensional del proceso de gasificación de biomasa lignocelulósica en lechos empacados en equicorriente", Universidad de Valladolid, 2007. 12, 21, 49, 96, 99, 101.
- [6] J.F. Pérez. "Estudio del proceso de gasificación de biomasa lignocelulósica mediante trabajos teórico experimentales". Reporte de Trabajo de Investigación, Universidad de Valladolid, 2006. 12, 21, 49, 96, 99, 101,102.
- [7] Ramírez, J.J., Martínez, J.D. and Petro, S.L., "Basic design of a fluidized bed gasifier for rice husk on a pilot scale", Latin American Applied Research 37, p. 299-306, 2007.
- [8] Kirubakaran, V. et al., "A review on gasification of biomass", Renewable and Sustainable Energy Reviews 13, p. 179-186, 2009.
- [9] Fernandes, M., "Investigação Experimental de Gaseificação de Biomassa em Leito Fluidizado", Ph.D. Thesis, UNICAMP, Campinas, Brazil, 2004.
- [10] Ankur Scientific Energy Technologies Pvt. Ltd. <http://www.ankurscientific.com/listofinstallation.htm>
- [11] Precipitated Silica from Rice Husk Ash IPSIT<  
<http://cgpl.iisc.ernet.in/site/Portals/0/Technologies/PrecipitatedSilica.pdf>>

## Nomenclatura

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$	Fracciones molares de carbono, hidrogeno, oxígeno y nitrógeno (%) [Definida en Ec. 1]
AF	Factor de Aire (Adimensional) [Definido en Ec. 26]
ash	Contenido de Cenizas (%) [Definido en Ec. 10]
Cp,air	Capacidad Calorífica del Aire (kJ/kg·K) [Definida en Ec. 14]
DR	Diámetro del Reactor (m) [Definido en Ec. 8]
$\dot{E}_{air}$	Flujo de Energía en el Aire (kJ/s) [Definida en Ec. 14]
$\dot{E}_{chemical,gas}$	Flujo de Energía Química en el gas producido (kJ/s) [Definida en Ec. 15]
$\dot{E}_{gas}$	Flujo de Energía del Gas Producido (kJ/s) [Definida en Ec. 15]
$\dot{E}_{lost}$	Flujo de Energía perdida (kJ/s) [Definida en Ec. 25]
$\dot{E}_{rh}$	Flujo de Energía en la Cascarilla de Arroz (kJ/s) [Definida en Ec. 13]
$\dot{E}_{sensible,gas}$	Flujo de Energía sensible en el gas producido (kJ/s) [Definida en Ec. 15]
$h_{f,i}^{\circ}$	Entalpia de formación de los compuestos i (kJ/kg) [Definida en Ec. 19]
LHVgas	Poder calorífico inferior del gas producido (kJ/s) [Definido en Ec. 17]
LHV <sub>i</sub>	Poder calorífico inferior de los compuestos i (kJ/kg) [Definido en Ec. 13]
MW <sub>i</sub>	Peso Molecular de los compuestos i (kmol) [Definido en Ec. 4]
$\dot{m}_{air,d}$	Flujo másico de aire en base seca (kg/s) [Definido en Ec. 5]
$\dot{m}_{air,h}$	Flujo másico del aire en base húmeda (kg/s) [Definido en Ec. 5]
$\dot{m}_{ash,partial}$	Flujo másico parcial de cenizas (kg/s) [Definido en Ec. 9]
$\dot{m}_{ash,total}$	Flujo másico total de Cenizas (kg/s) [Definido en Ec. 9]
$\dot{m}_{gas}$	Flujo másico del gas producido (kg/s) [Definido en Ec. 12]
$\dot{m}_{rc}$	Flujo másico del carbono residual (kg/s) [Definido en Ec. 11]
$\dot{m}_{rh,d}$	Flujo másico de cascarilla de arroz en base seca (kg/s) [Definido en Ec. 2]
$\dot{m}_{rh,h}$	Flujo másico de cascarilla de arroz en base húmeda (kg/s) [Definido en Ec. 3]
$\eta_c$	Eficiencia en frío (%) [Definido en Ec. 29]
$\eta_h$	Eficiencia en Caliente (%) [Definido en Ec. 30]
$\mu$	Moles de agua en el aire (kmol) [Definido en Ec. 1]
$n_i$	moles de los compuestos i [Definido en Ec. 5]
$P_R$	Presión en el reactor (kPa) [Definido en Ec. 8]
Rair	Constante del gas para el aire (kPa.m <sup>3</sup> /kmol.K) [Definida en Ec. 8]
Rair/rh,real	Relación aire- cascarilla de arroz real [Definida en Ec. 28]
Rair/rh,stequiometric	Relación aire-cascarilla de arroz estequiometria [Definida en Ec. 27]
rc	Carbono residual (%) [Definido en Ec. 12]
rh <sub>rh</sub>	Humedad residual de la cascarilla de arroz (%) [Definida en Ec. 3]
Tair	Temperatura del aire (K) [Definida en Ec. 14]
Tnormal	Temperatura @ condiciones normales (K) [Definida en Ec. 28]
TR	Temperatura de gasificación (K) [Definida en Ec. 8]
Tref	Temperatura de referencia @ condiciones ambiente [Definida en Ec. 14]
$\theta$	Moles de agua en la cascarilla de arroz (kmol) [Definido en Ec. 1]
U <sub>mf</sub>	Velocidad de Fluidización (m/s) [Definida en Ec. 8]
$\omega$	Humedad absoluta (kg <sub>h</sub> /kg <sub>air,dry</sub> ) [Definida en Ec. 7]
$x_i$	Coefficientes estequiométricos de los componentes i (1/s) [Definidos en Ec. 1]
$y_i$	Fracciones molares del monóxido de carbono, hidrogeno y metano (%) [Definidos en Ec. 1]