

## EVALUACIÓN TEÓRICO EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA AVANZADO GASIFICADOR DE BIOMASA/MOTOR RECIPROCANTE PARA LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD. (PARTE II)

Dr. René Lesme-Jaén<sup>I</sup>, [lesme@ceefe.uo.edu.cu](mailto:lesme@ceefe.uo.edu.cu), Msc. Juan Daniel Martínez<sup>II,III</sup>

Dr. Rubenildo Viera-Andrade<sup>II</sup>, Dr. Electo Eduardo Silva-Lora<sup>II</sup>

<sup>I</sup>Facultad de Ingeniería Mecánica, Centro de Estudios de Eficiencia Energética, Universidad de Oriente, Cuba.

<sup>II</sup>Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade

Federal de Itajubá, Brasil, <sup>III</sup>Grupo de Investigaciones Ambientales, Instituto de Energía, Materiales y Medio

Ambiente, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia

*La gasificación de biomasa es una forma de conversión de energía que todavía se mantiene en etapa de investigación y desarrollo con algunas aplicaciones en la generación de electricidad. La actividad científico investigativa sobre el tema, ha estado centrada a la mejoría del diseño, modelación y evaluación de diferentes tipos de gasificadores, las aplicaciones prácticas se han llevado a cabo fundamentalmente a través de instalaciones de pequeña y mediana potencias para la generación de energía eléctrica usando motores de combustión interna. En éste trabajo presentamos la evaluación de un sistema gasificador/motor de combustión interna, para determinar; los parámetros operacionales del gasificador, la calidad del gas que él produce y la potencia eléctrica y gases contaminantes que se puede generar en el motor. La calidad del gas se evalúa atendiendo a su contenido de alquitrán y particulados. La novedad consiste en la utilización de un gasificador con dos etapas (puntos) de inyección de aire, como una solución para mejorar la calidad del gas producido. En el trabajo se demuestra, como la utilización de una segunda inyección de aire en el gasificador disminuye el contenido de alquitrán del gas con respecto a otros tipos de gasificadores y durante la generación de electricidad las emisiones de NOx disminuyen con respecto al gas natural.*

**Palabras clave:** biomasa, gasificación.

*The biomass gasification is one way energy conventions which maintain in phase the investigation and development with some application in the electrical generation. The scientific investigation activity about theme hit the center away improvement a design; modelation and evaluation of different type the gasifiers, the practical applications carry out through small and middle power for electric energy generation to use combustion internal engine. In this work presented the evaluation of a gasifier system/internal combustion engine for determine: the operational parameters of the gasifier, the quality of the gas it produces and the electrical power and pollutant gases can be generated in the engine. The quality of the gas is evaluated according to its content of tar and particulate. The novelty consists in the use of a gasifier with two stages (points) of air injection, as a solution to improve the quality of the gas produced. At work we demonstrate how the use of a second injection of air into the gasifier decreases the tar content of the gas with regard to other types of gasifiers and during electricity generation of NOx emissions decrease with respect to natural gas.*

**Key words:** biomass, gasification.

### Introducción

La gasificación de biomasa, es la termo-conversión de la misma en un gas combustible apto para la combustión directa y con un tratamiento adecuado, entre otras aplicaciones, puede ser utilizado en motores de combustión interna para generar electricidad. Uno de los

mayores problemas de ésta tecnología es la formación de alquitrán, el cuál puede ocasionar el colapso de la gasificación debido al bloqueo y ensuciamiento de las tuberías y válvulas, además del mal funcionamiento de los equipos donde el gas será utilizado. El contenido de alquitrán es fuertemente dependiente de las condiciones operacionales del gasificador, del

tipo de gasificador, de las características de la biomasa y del agente de gasificación usado.

Las tecnologías para el control del alquitrán pueden ser divididas en dos; tratamiento dentro del gasificador (métodos primarios) y limpieza del gas caliente después del gasificador (métodos secundarios)/1, 2/. Dentro de los métodos primarios se utiliza la gasificación en dos etapas, en nuestro caso consiste el suministro del aire en dos puntos de inyección (estadios), uno en la zona de pirólisis y otra en la zona de combustión, para garantizar un aumento de la temperatura en dicha zona y una reducción del contenido de alquitrán del gas.

En la primera parte de éste trabajo, presentamos la evaluación termodinámica de un gasificador y la identificación de las mejores condiciones para el trabajo, las cuales se corresponden a un flujo de aire de 20 Nm<sup>3</sup>/h con una relación entre el volumen de aire por el primer estadio y el segundo estadio R<sub>a</sub> = 80 %, una eficiencia en frío de 70,78 % y un poder calórico bajo del gas de 4,53 MJ/Nm<sup>3</sup>. Bajo esta condición el gasificador produce 2,7 Nm<sup>3</sup> por kilogramos de biomasa alimentada y alcanza una potencia térmica de 50 kW<sub>t</sub>.

El objetivo de esta segunda parte del trabajo es la determinación de los parámetros operacionales del gasificador y la evaluación, bajo las condiciones anteriores, del contenido de alquitrán y particulados del gas, así como, la evaluación del motor de combustión interna, desde el punto de vista de la potencia generada y emisiones de gases.

## Desarrollo

### Parámetros operacionales

Se consideran parámetros operacionales de un gasificador los siguientes indicadores: capacidad

de producción de gas (Yield), factor de aire (FA), velocidad superficial del gas generado (V<sub>g</sub>), tasa específica de gasificación (SRG), estos se pueden determinar a través de las siguientes expresiones. /3-11/

### Capacidad de producción de gas.

$$Yield = \frac{V_g}{m_b} \quad (1)$$

donde:

V<sub>g</sub>: Flujo volumétrico de gas generado.

### Factor de aire

$$FA = \frac{m_a}{(R_{A/C})_{est} \cdot \rho_a} \cdot \frac{1}{V_g \cdot \rho_g \cdot A - m_a + m_r} \quad (2)$$

### Velocidad superficial del gas generado

$$V_g = \frac{V_g}{A} \quad (3)$$

donde:

A: Área de la sección transversal del reactor.

### Tasa específica de gasificación

$$SRG = \frac{m_b}{A} \quad (4)$$

Los resultados de los cálculos para las relaciones entre el volumen de aire por el primer estadio y el segundo estadio (R<sub>a</sub>, ecuación 5) y los valores de V<sub>g</sub>, m<sub>b</sub>, m<sub>a</sub>, m<sub>r</sub> determinados en la primera parte de este trabajo se presentan en las figuras 1, 2, 3 y 4.

$$R_a = \frac{(V_a)_{1est}}{(V_a)_{2est}} \cdot 100 \quad (5)$$

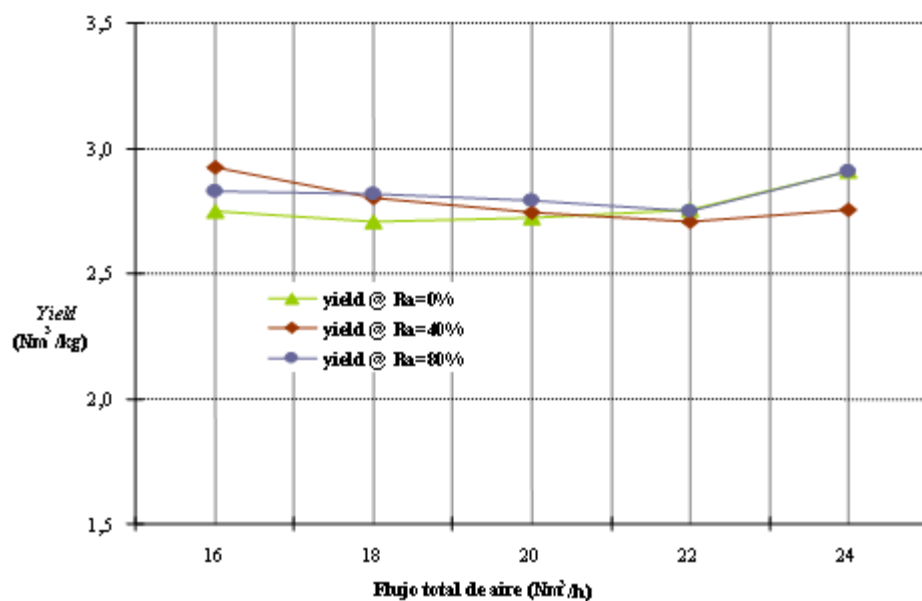


Fig. 1 Capacidad de producción de gas por unidad de biomasa alimentada (Yield) para  $R_a = 0, 40$  y  $80\%$ .

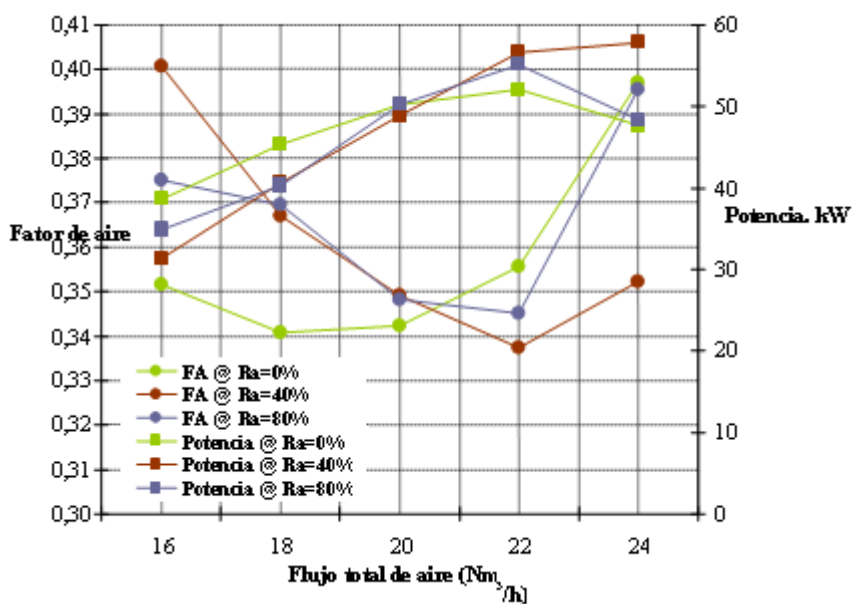


Fig. 2 Comportamiento del factor de aire y la potencia del gas para  $R_a = 0, 40, 80\%$ .

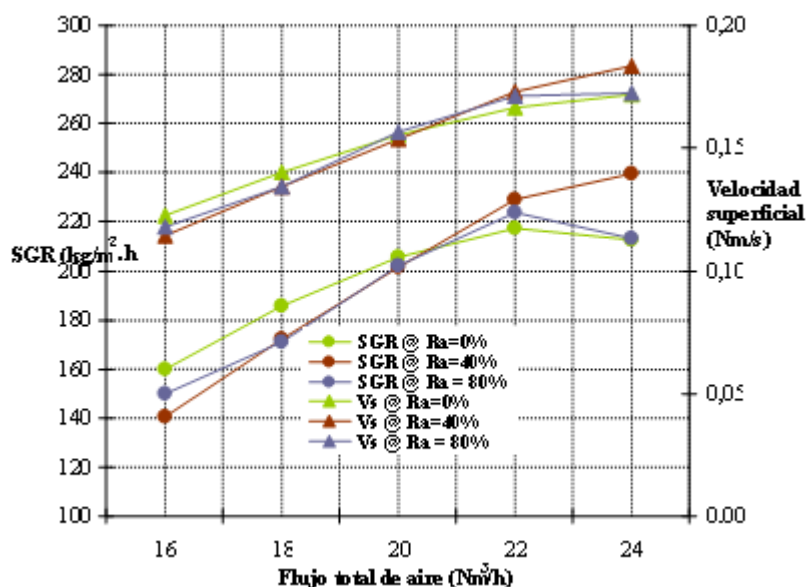


Fig. 3 Tasa específica de gasificación y velocidad superficial del gas para  $R_a = 0, 40$  e  $80\%$ .

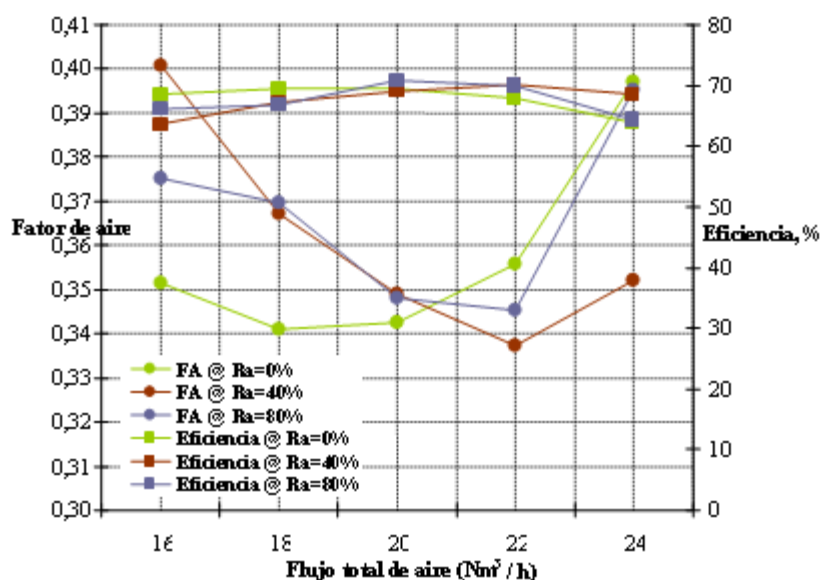


Fig. 4 Comportamiento del factor de aire y la eficiencia en frío para  $R_a = 0, 40, 80\%$ .

En la figura 1 se confirma que la mayor capacidad de producción de gas del reactor se logra para una  $R_a = 80\%$  ( $2,7-2,8 \text{ Nm}^3/\text{kg}$  de biomasa alimentada), para estas condiciones el factor de aire está próximo a  $0,35$  y la potencia del reactor de  $50 \text{ kWt}$ , según la figura 2.

En ésta misma figura 2 se puede apreciar que es posible utilizando un volumen de aire de  $22 \text{ Nm}^3/\text{h}$  aumentar en un  $4\%$  la potencia del reactor utilizando

una distribución de aire  $R_a = 40\%$ , como se había concluido en la primera parte del trabajo.

En esta condición se logra un aumento del poder calórico del gas, de la velocidad superficial del gas y de la tasa específica de gasificación (figuras 3 y 4), pero también habrá una disminución de la eficiencia en frío del gasificador (figura 4) y un aumento del contenido de metano del gas, por lo que es posible esperar un aumento de su contenido de alquitrán

afectando su calidad, como se demostró en la primera parte de éste trabajo.

### Mediciones del contenido de alquitrán y partículas sólidas en el gas

Identificadas las condiciones de mayor estabilidad y los parámetros operacionales del gasifica-

dor, así como, la eficiencia del gasificador se procedió a evaluar el contenido de alquitrán y partículas del gas a la salida del mismo (después del ciclón), para determinar si éste es capaz de, bajo la condición de doble estadío de suministro de aire, mejorar la calidad del gas, tomando como referencia lo reportado en la literatura para otros gasificadores /12-16/ (tabla 1)

Tabla 1  
Rango de concentraciones de alquitrán y partículas sólidas en el gas producido por diferentes gasificadores de un solo estadío

Valores (mg/Nm <sup>3</sup> )	Lecho fijo		Lecho fluidizado
	concurrente	contracorriente	Circulante
Alquitrán	10 – 6000	10000 - 150000	2000 – 30000
Particulado	100 - 8000	100 - 3000	8000 – 100000

El contenido de alquitrán y partículas en el gas se determinó por medio de un análisis gravimétrico utilizando un dispositivo de toma de muestras GRASEBY 200, Universal Sampler, el procedimiento experimental se recoge en la cita bibliográfica. /13/ En

total se realizaron 4 mediciones experimentales, en la tabla 2 se resumen los resultados de éstas pruebas, además se muestran las concentraciones de CO, H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> del gas a la salida del gasificador tanto al inicio como al final de las pruebas.

Tabla 2  
Mediciones experimentales del contenido alquitrán y partículas en el gas

Pruebas	Valores				
	Alquitrán (mg/Nm <sup>3</sup> )	Particulados (mg/Nm <sup>3</sup> )	CO (%)	H <sub>2</sub> (%)	CH <sub>4</sub> (%)
1	1 692,038 2	47,9469	18,8-18,7	15,56-14,31	1,5-1,2
2	962,912 7	-	18,1-16,9	15,03-12,7	1,6-0,8
3	464,045 9	22,688 26	14,1-15,7	13,05-13,36	2,08-1,2
4	150,328	100,093 8	17,9-20,0	15,69-16,6	1,5-1,0

Los valores iniciales y finales de CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> reportados en la tabla 2 están en el rango de los obtenidos para la condición de mayor estabilidad, lo cual confirma que durante la prueba se estableció esta condición.

Los resultados obtenidos están en correspondencia con los valores reportados para diferentes tipos de gasificadores, con valores de contenido de particulados por debajo de los mínimos repor-

tados en la literatura y valores del contenido de alquitrán muy por debajo de la media.

Evaluaciones experimentales realizadas a otros gasificadores concurrentes que funcionan con un sólo estadío, muestran valores 950 mg/Nm<sup>3</sup> de particulados y 1300 mg/Nm<sup>3</sup> de alquitrán/16/ y para un gasificador de lecho fluidizado 700 mg/Nm<sup>3</sup> de particulado y 13200 mg/Nm<sup>3</sup> /13/. Estos resultados demuestran que con el uso del doble estadío de

suministro de aire se consigue una mejora de la calidad del gas.

### Pruebas experimentales en el motor

Una vez logrado el régimen permanente bajo las condiciones de mayor rendimiento del gasificador en términos de estabilidad, calidad del gas y eficiencia en frío (20 Nm<sup>3</sup>/h de aire, R<sub>a</sub> = 80 %)

se procedió a pasar y almacenar el gas en el gasógeno y luego suministrarlo al motor.

Durante las pruebas se registraron los siguientes parámetros: flujo y temperatura del aire a la entrada del motor, flujo de gas a la entrada del motor, temperatura y composición de los gases a la salida del motor, así como el coeficiente de exceso de aire y la potencia del motor (tabla 3).

Tabla 3  
Mediciones experimentales en el motor

Potencia (Kwe)	Qar (m <sup>3</sup> /s)	Tar °C	V gas (m/s)	Tgas °C	Emisiones					
					CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (%)	NO <sub>x</sub> ppm	SO <sub>x</sub> ppm	O <sub>2</sub> (%)	λ
0 (GLP)	1,91	28,8	-	170,8	1078	6,4	55	0	8,1	1,57
0	1,36	33,5	2,24	259,3	7779	9,4	52	0	2,3	1,11
1,67	2,73	33,8	3,01	284,7	3547	8,3	47	0	6,1	1,29
1,70	1,67	27,7	2,65	298,5	18073	9,2	35	0	2,8	1,13
2,55	2,59	29,5	2,75	310,9	6284	9,0	34	0	3,3	1,16
3,41	3,87	31,8	4,20	317,7	2976	8,4	41	0	3,8	1,23
3,60	3,16	34,1	3,42	314,6	2690	8,6	95	0	4,0	1,21
4,25	3,93	32,8	4,34	334,6	2700	9,4	55	0	3,2	1,09
5,10	4,12	35,7	4,33	342,0	0	9,3	0	0	2,3	1,10
5,10	4,86	36,2	3,43	320,6	5645	2,2	7	0	16,6	1,25
5,35'	4,40	-	4,02	-	-	-	-	-	-	-

\* Para las condiciones de 22 Nm<sup>3</sup>/h, R<sub>a</sub> = 40 %

Las cargas son establecidas por medio de un panel sincronismo, en el cuál es posible registrar la carga propiamente dicha y la frecuencia de generación (60 Hz). La primera prueba fue realizada sin carga trabajando el motor con gas natural (GLP), en la segunda prueba el motor trabajó sin carga con gas pobre y las restantes pruebas fueron realizadas con éste gas para las cargas especificadas. La última prueba reportada se llevó a cabo para las condiciones de 22 Nm<sup>3</sup>/h de aire en el gasificador con una relación R<sub>a</sub> = 40 %, garantizándose una potencia térmica de 5,35 kW, lo cual confirma los resultados obtenidos durante la evaluación del gasificador. En todos los casos las cargas fueron mantenidas establemente por el motor durante un período de una hora.

El flujo de aire fue medido por medio de un tubo Pitot y el flujo de gas mediante una placa de orificio diseñada y calibrada al efecto. Los otros parámetros, fueron registrados a través de una sonda isocinética introducida en la tubuladura de escape del motor y acoplada a un analizador de gases portátil EcoLine 6000-GreenLine 8000.

Es evidente que con el empleo del gas pobre hay un aumento de la temperatura de salida de los gases de escape y un aumento del contenido de CO y CO<sub>2</sub> con respecto al GLP. Comportamiento diferente se observa en el contenido de NO<sub>x</sub>, gas que tiene un mayor efecto nocivo sobre el medioambiente y la salud humana.

El sistema tiene una eficiencia general referida a la potencia térmica del gasificador del 10 %,

o sea, es capaz de generar 1 kW eléctrico por cada 10 kW<sub>t</sub> a la salida del gasificador, con un consumo específico de biomasa de 2,96 kg/kW<sub>e</sub>-h.

## Conclusiones

- Bajo la condición de mayor eficiencia y estabilidad de el gasificador sus parámetros operacionales son: factor de aire 0,35, Yield 2,7 Nm<sup>3</sup> por kg de biomasa alimentada, tasa específica de gasificación de 210 kg/m<sup>2</sup>.h.
- Los resultados obtenidos a partir de las mediciones del contenido de alquitrán y partículas sólidas del gas generado, están por debajo de los valores medios reportados en la literatura y en las evaluaciones hechas a gasificadores concurrentes con una única inyección de aire, lo cual demuestra que con el uso dos puntos de suministro de aire se consigue una mejora de la calidad del gas.
- El motor trabajó establemente para las cargas sincronizadas durante una hora con una eficiencia del 10 % referida a la potencia térmica del reactor y un consumo específico de biomasa de 2,96 kg/kW<sub>e</sub>-h, estos valores pueden ser mejorados con el aislamiento térmico del reactor.
- Acorde a las mediciones de sustancias contaminantes a la salida del motor, la tecnología, con el empleo del gas pobre, demuestra tener un menor impacto negativo sobre el medioambiente en comparación con el gas natural debido a las menores concentraciones de NO<sub>x</sub> registrada.
- El empleo del gas pobre en motores requiere valores del coeficiente de aire cercanos a la unidad (estequiométricos), con temperaturas de salidas del gas pobre superior a la del gas natural, aumentando las posibilidades de cogeneración de esta tecnología.

## Bibliografía

1. DEVI, L., K. J. Ptasiński, JANSSEN FJJG. *A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes*. Biomass Bioenergy. 2003. 24(2). Págs. 125-40.
2. HAN J., H. Kim H. *The reduction and control technology of tar during biomass gasification/ pyrolysis: an overview*. Renew Sust Energy Rev. 2008;12. Págs. 397-416.
3. Valentino M., M. Tiango, Bryan, Jenkins, R. Jonh. GOSS. *Optimum specific gasification rate for static ded rice hull gasifiers*. Biomass and Energy. vol. 11, No. 1. 1996. Págs. 51-62.
4. WANDER, Paulo R. Carlos R. ALTAFINI, Ronaldo M. BARRETO. *Assessment of a small sawdust gasification unit*. Biomass and Bioenergy No. 27. 2004. Págs. 467-476.
5. Agustín GARCÍA BARNETO, José ARIZA CARMONA, Araceli GÁLVEZ, and Juan A. CONESA. *Effects of the Composting and the Heating Rate on Biomass Gasification*. Energy & Fuels. No. 23. 2009. Págs. 951-957.
6. Gaseificação de Madeira em gasificador co-corrente para produção de gás de médio poder calórico e gás de síntese. Autor: Zsolt Tamas makray. Tese submetida à Comissão de campinas-UNICAMP. Abril de 1984.
7. BILBAO Rafael, Pedro GARCÍA, Rafael Rodrigo, Ana LOGROÑO, Jesus ARAUZO. *Desarrollo de Gasificación de lecho móvil en corrientes descendentes para reiduos lignocelulósicos*. Dpto de Ingeniería química y T.M.A. Facultad de Ciencias. Universidad de Zaragoza. Mayo 1990.
8. *Ibidem*.
9. HENRIKESSEN Ulrik, Jesper AHRENFELDT, Jensen TORBEN KVIST, Beny GOBEL, Jens DALL BENTZEN, Claus HINDSGAUL, Lasse HOLST SORENSEN. *The design, construction and operation of a 75 kW two-stage gasifier*. Energy No. 31. 2006. Págs. 1542-1553.
10. MARTINS, Gilberto, Gilberto, Antonio GARRIDO GALLEGO. *Thermal performance and specific co emission evaluation of a small scale downdraft wood burner for domestic cookstoves*. Proceedings of ECOS 2009 22nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization. Brasil. 2009. ISSN 2175-5426.
11. T. B. Reed, R. Walt, S. Ellis, A. Das, S. Deutch. *Superficial velocity- The key to downdraft gasification*. 4th Biomass Conference of the Americas, Oakland, CA. 2009.
12. WARNECKE, Ragnar. *Gasification of biomass: comparison of fixed and fluidized bed gasifier*. Biomass and Energy No. 18. 2000. Págs. 489-497.
13. ANDRADE, R. *Gaseificação de Biomassa: Uma Análise Teórica e Experimental*, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, 2007, Pág. 205.
14. Chen Hanping, Li Bin, Yang Haiping,\* Yang Guolai, and Zhang Shihong. *Experimental Investigation of Biomass Gasification in a Fluidized Bed Reactor*. Energy & Fuels. Año 2008. No. 22. PP. 3493-3498.
15. I. DE BARI, D. BARISANO, M. CARDINALE, D. MATERA, F. NANNA, and D. VIGGIANO. *Air Gasification of Biomass in a Downdraft Fixed Bed*:

- 
- A Comparative Study of the Inorganic and Organic Products Distribution.* Energy & Fuels . No. 14, 2000. Págs. 889-898.
16. Gaseificação de Madeira em gasificador co-corrente para produção de gás de médio poder calórico e gás de síntese. Autor: Zsolt Tamas makray. Tese submetida à Comissão de Campinas-UNICAMP. Abril de 1984.
17. A. A. C. M. Beenackers. Biomass gasification in moving beds, a review of european technologies. Renewable Energy 16. 1999. I . Págs. 181- 186.