

En español

Gasificación de materiales orgánicos residuales

Santiago Ramírez Rubio¹, Fabio Emiro Sierra², Carlos Alberto Guerrero³

RESUMEN

En este artículo se describe tanto la operación del gasificador de biomasa de lecho fijo, diseñado y construido por el Grupo de Investigación en Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética, como el equipo en sí y su sistema de medición. Las experimentaciones desarrolladas se han hecho con diversos desechos agroindustriales (biomasas como madera residual y cáscaras de coco, cacao y café), donde se toman mediciones de temperaturas a lo largo del lecho, su presión, el caudal de aire de entrada y el porcentaje de composición de monóxido y dióxido de carbono en el gas de síntesis producido en el proceso. El resultado de las experiencias ha sido la obtención de un gas combustible adecuado para ser introducido en un motor de combustión interna que posteriormente pueda generar energía eléctrica, ya que en varios puntos de la operación se ha obtenido mayor cantidad de monóxido de carbono que de dióxido de carbono. De la experimentación fue posible observar que un equipo de gasificación de estas características es adecuado para llevar energía a lugares que tienen difícil acceso a ésta (como varios sectores rurales de América Latina) o a sitios que produzcan una cantidad importante de desechos agroindustriales. En el proceso se obtuvieron temperaturas, en la zona de combustión, de alrededor de 1.000 °C, con un gas de síntesis que, en su composición, alcanzó a tener porcentajes superiores al 20% en monóxido de carbono, obteniendo de esta forma un gas combustible.

Palabras clave: gasificación, biomasa, lecho fijo, gas de síntesis, energías renovables.

Recibido: agosto 27 de 2010

Aceptado: noviembre 4 de 2011

Introducción

El Grupo de Investigación en Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética, perteneciente a la Universidad Nacional de Colombia, ha diseñado y construido un sistema para la gasificación de biomasa cuyo reactor es de lecho fijo y flujo paralelo. El sistema consta del reactor donde se producen las reacciones necesarias para la obtención del gas de síntesis, un ciclón que se encarga de la recolección de material particulado, un intercambiador de calor donde se condensa la mayor parte de agua y

In English

Gasification from waste organic materials

Santiago Ramírez Rubio⁴, Fabio Emiro Sierra⁵, Carlos Alberto Guerrero⁶

ABSTRACT

This article describes the fixed bed biomass gasifier operation designed and built by the Clean Development Mechanisms and Energy Management research group, the gasifier equipment and the measurement system. The experiment involved agro-industrial residues (biomass such wood chips, coconut shell, cocoa and coffee husk); some temperatures along the bed, its pressure, inlet air flow and the percentage of carbon monoxide and carbon dioxide in the syngas composition were measured. The test results showed that a fuel gas was being obtained which was suitable for use with an internal combustion engine for generating electricity because more carbon monoxide than carbon dioxide was being obtained during several parts of the operation. The gasification experimentation revealed that a gasifier having these characteristics should be ideal for bringing energy to areas where it is hard to obtain it (such as many rural sites in Latin-America) or other places where large amounts of agro-industrial wastes are produced. Temperatures of around 1,000°C were obtained in the combustion zone, generating a syngas having more than 20% carbon monoxide in its composition, thereby leading to obtaining combustible gas.

Keywords: gasification, biomass, fixed bed, syngas, renewable energies

Received: August 27th 2010

Accepted: November 4th 2011

Introduction

The Universidad Nacional de Colombia's Clean Development Mechanisms and Energy Management research group has designed and built a system for biomass gasification involving a fixed-bed parallel flow reactor. The system consisted of the reactor where the necessary reactions were produced to obtain the synthesis gas (syngas), a cyclone responsible for collecting particulate matter, a heat exchanger condensing the bulk of the water and tar present in the gas so produced, a ventilator creat-

¹Ingeniero Aeronáutico, Universidad San Buenaventura, Magíster en Ingeniería mecánica, Universidad Nacional de Colombia. Profesor, Universidad San Buenaventura. santiagoramirezr@gmail.com

²Doctor en Ingeniería, Universidad de Kassel. Profesor asociado, Universidad Nacional de Colombia. fesierav@unal.edu.co

³Ingeniero Químico y Mecánico, Magíster en Ingeniería ambiental, Doctor en Ingeniería Química. Profesor asociado, Universidad Nacional de Colombia. caguerrero@unal.edu.co

⁴Aeronautical Engineer, Universidad San Buenaventura, Masters in Mechanical Engineering, Universidad Nacional de Colombia. Profesor, Universidad San Buenaventura. santiagoramirezr@gmail.com

⁵Doctor of Engineering, Universidad de Kassel. Associate Professor, Universidad Nacional de Colombia. fesierav@unal.edu.co

⁶Chemical Engineering and Mechanical, Master in Environmental Engineering PhD in Chemical Engineering. Associate Professor, Universidad Nacional de Colombia. caguerrero@unal.edu.co

En español

alquitranes presentes en el gas producido un ventilador que genera la succión necesaria para propiciar el flujo de gas a través del sistema y un módulo para la medición y toma de datos del proceso. En la figura 1 se pueden observar el sistema de gasificación (reactor y preparación del gas) y los dos módulos exteriores mencionados.



Figura 1. Equipo de gasificación.

La gasificación de biomasa es un proceso ampliamente usado como fuente de energía en todo el mundo. Es así como varios autores documentan su utilización: la biomasa como fuente energética en Brasil (Lora y Andrade, 2009), la gasificación en Japón (Min *et al.*, 2005) y la gasificación de hojas de caña para la producción de electricidad en India (Jorapur y Rajvanshi, 1995), solo por mencionar algunos de los que tratan el tema.

Varios trabajos sobre gasificación (con aire) de biomasa en lecho fijo brindan resultados similares a los que se exponen en el presente artículo (Dogru *et al.*, 2002), (Sharma, 2009), (Sheth y Babu, 2009), (Zainal *et al.*, 2002). Todos evaluaron el comportamiento del proceso en cuanto a temperaturas y producción de dióxido y monóxido de carbono. Aunque no es el caso del presente artículo, es posible encontrar autores que trabajaron gasificación con diferentes agentes (Ahmed y Gupta, 2009), como el vapor de agua en la gasificación de papel. En la figura 2 puede observarse el diagrama de flujo de cómo se desarrolla la gasificación de biomasa.

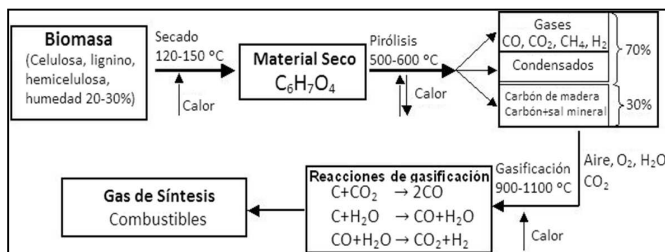


Figura 2. Diagrama de flujo de la gasificación (Sierra y Klose, 2008).

Parámetros del proceso de gasificación

Para el desarrollo de este procedimiento se deben tener en cuenta varios parámetros que afectan el proceso. Son cinco las principales variables que afectan el proceso de gasificación:

In English

ing the necessary suction to facilitate gas flow through the system and a module for data acquisition and measurement. Figure 1 shows the gasified system (reactor and gas preparation) and the aforementioned external modules.

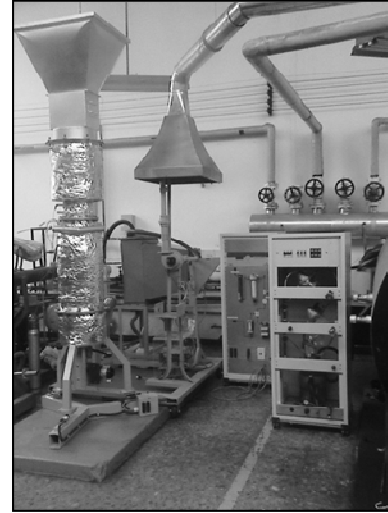


Figure 1. Gasifier system

Biomass gasification is widely used as an energy resource around the world. Several authors have documented its use, such as biomass as energy source in Brazil (Lora and Andrade, 2009), gasification in Japan (Min *et al.*, 2005) and gasification of cane leaves for producing electricity in India (Jorapur and Rajvanshi, 1995).

Several works on fixed-bed biomass gasification (with air) have found similar results to those presented in this article (Dogru *et al.*, 2002; Sharma, 2009; Sheth and Babu, 2009; Zainal *et al.*, 2002). All evaluated the process in terms of temperature and carbon dioxide and monoxide production. Although not the case in this article, some authors have worked on gasification using different agents (Ahmed and Gupta, 2009) such as water vapour in the gasification of paper. Figure 2 gives the biomass gasification flow diagram.

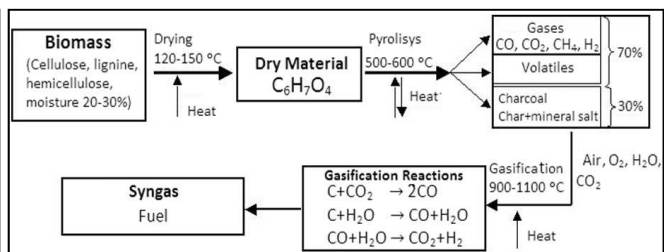


Figure 2. Gasification flow diagram (Sierra and Klose, 2008)

Gasification parameters

This research needed to take different parameters into account; the five major variables affecting gasification are given below.

La temperatura

La gasificación se realiza a temperatura constante en permanencia de un medio gasificante y dicha temperatura se sostiene hasta que no se presente más pérdida de masa, es decir, hasta que solamente haya cenizas. Se pueden presentar principalmente tres casos: bajas, medias y altas temperaturas.

A temperaturas de 800 a 900 °C la transferencia de masa y la difusión en los poros son mucho más rápidas que la reacción química, por lo tanto el factor controlante de la velocidad es la *cinética química*. La temperatura es, además, el parámetro que define las zonas de pirólisis (entre 400-700 °C), combustión (entre 800- 1.300 °C) y reducción (entre 700-900 °C) en un proceso de gasificación (Sierra, 2008).

Tiempo de permanencia

Al aumentar el *tiempo* durante el cual se permite a la biomasa reaccionar con el agente oxidante y la *temperatura* a la cual se lleva el proceso de gasificación, disminuye la cantidad de material sólido remanente y aumenta la proporción de gases generados.

Agente oxidante

Para el desarrollo del proceso de gasificación se puede utilizar el aire, el oxígeno, el dióxido de carbono, el vapor de agua o una mezcla de estos, sin embargo cada uno de ellos tienen distintas características de reacción.

La gasificación con aire produce un gas de calidad pobre en cuanto a su poder calorífico (4-7 MJms⁻³) debido a su baja densidad energética.

La *gasificación con oxígeno* produce un gas de mejor calidad (10-18MJms⁻³), pero implica altos costos para la producción del oxígeno y se presentan mayores riesgos durante el proceso de gasificación.

En la *gasificación con vapor de agua o dióxido de carbono* como medio de gasificación, el gas que se obtiene es de una calidad similar al logrado con oxígeno; además, se evitan los altos costos de producción y los riesgos de operación, la cual es de tres a cinco veces más rápida que la gasificación con dióxido de carbono (Sierra et al., 2009).

Materia prima

La materia prima para la gasificación es el carbonizado obtenido al finalizar el proceso de pirólisis, que cuando se lleva a cabo completamente y a altas temperaturas se logra un área superficial grande, indicativo de buena disponibilidad de carbono para la reacción (Sierra et al., 2009).

Se denominan catalizadores para la gasificación de biomasa con vapor o con dióxido de carbono a los elementos con los cuales pueden estar formadas las cenizas, como potasio, magnesio, sodio, hierro y calcio.

Reactividad

La reactividad del carbonizado está influenciada por: la estructura química, que determina el número de sitios activos; el área superficial interna y la porosidad, que controlan las velocidades de difusión; los compuestos inorgánicos, que pueden tener un

Temperature

Gasification is carried out at constant temperature in permanent contact with a gasified agent; such temperature remains constant until there is no more loss of mass, meaning until only ashes are left. Gasification involves low medium and high temperatures.

Mass transfer and pore diffusion are faster than the chemical reaction at 800°C to 900°C; chemical kinetics therefore controlling gasification speed. Moreover, temperature defines the pyrolysis (400°C-700°C), combustion (800°C-1,300°C) and reduction (700°C-900°C) zones involved in gasification (Sierra, 2008).

Residence time

Increasing the time during which the biomass is allowed to react with the oxidising agent and the gasification temperature leads to a decrease in the amount of solid material remaining and increases the percentage of gases.

Oxidising agent

Air, oxygen, carbon dioxide, steam or a mixture of all of them may be used for gasification; however, each one has different reaction characteristics.

Air gasification produces poor quality gas regarding calorific value (4-7 MJ.m⁻³) due to its low energy density.

Oxygen gasification produces better quality gas (10-18 MJ.m⁻³) but it implies high oxygen production costs and risk is higher during the process.

In *steam gasification* or *carbon dioxide as gasified agent*, the gas so obtained has a similar quality to that obtained with oxygen; it also avoids high production costs and operating risks. This is 3 to 5 times faster than carbon dioxide gasification (Sierra et al., 2009).

Feedstock

Gasification feedstock (i.e. any organic matter) leads to a carbonised product being obtained at the end of pyrolysis; when completed at high temperatures, a larger surface area is obtained, indicating great carbon availability for the reaction (Sierra et al., 2009).

Elements which may be formed from the ashes, such as potassium, magnesium, sodium, iron and calcium are called biomass catalysts for steam or carbon dioxide gasification.

Reactivity

The carbonised products' reactivity is influenced by their chemical structure determining the number of active sites, the internal surface area and porosity controlling diffusion speed and the inorganic compounds which might have a catalyst or inhibitor

efecto catalizador o inhibidor (Sierra et al., 2009).

Cinética química

Los procesos fisicoquímicos que ocurren durante la gasificación son, principalmente: 1) la transición de la materia prima a carbonizado; 2) la subsiguiente reducción de este.

En los gasificadores de lecho fijo la producción del carbonizado y de los volátiles son importantes debido a la baja tasa de calentamiento (<100 °C/min) y el largo tiempo de permanencia de los sólidos. El comportamiento térmico de la materia orgánica se estudia con frecuencia por medio de análisis termogravimétrico (TGA), midiendo la tasa de pérdida de peso de la muestra en función del tiempo y la temperatura. El TGA solamente ofrece análisis semicuantitativos de los procesos de pirólisis pues los porcentajes de pérdida de peso son función, no solamente del tiempo y la temperatura, sino además del tamaño y la densidad de la muestra, ajustándose a la ecuación general:

$$\frac{dV}{dt} = -KV \tag{1}$$

$$\frac{dV}{dt} = -K \frac{V}{HR} \tag{2}$$

Donde *t* es el tiempo, *K* el porcentaje constante, igual a $A \exp(-E/RT)$, *A* es el factor preexponencial, *E* la energía de activación, *R* la constante universal de los gases, *V* el total de volátiles a la temperatura *T* y *HR* el porcentaje de calentamiento igual a dT/dt . El rango de *E*, 26-33 Kcal/g-mol, además fue postulado. Aunque la ecuación puede estimar la tasa de descomposición de la celulosa bien sobre un rango de bajos porcentajes de calentamiento, el análisis no puede predecir la variación de la formación de carbonizado y los productos gaseosos con diferentes condiciones de pirólisis (Sierra et al., 2009).

Tabla 1 . Reacciones básicas del proceso de gasificación (Sierra, 2006).

Reacción	Formula	Proceso	ΔH kJ/mol
1 Oxidación heterogenea	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	Combustión	-393
	$C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$	Combustión incompleta	-110
2 Reacción heterogenea en equilibrio	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$	Bouduard	+172
	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	Reacción agua-gas heterogenea	+131
	$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$	Gasificación con hidrógeno	-75
3 Oxidación homogenea	$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$	Oxidación de CO	-283
	$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$	Metanización	-206
	$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$	Oxidación de hidrógeno	-242
	$CH_4 + \frac{3}{2}O_2 \rightarrow CO + 2H_2O$	Oxidación del metano	-519
4 Reacción homogenea en equilibrio	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	Reacciones agua-gas	-41
	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$		-206

Por otro lado, en la tabla 1 podemos apreciar, de forma resumida, las reacciones básicas de acuerdo con las cuales se rige un proceso de gasificación.

effect (Sierra et al., 2009).

Chemical kinetics

The physicochemical process occurring during gasification consists of transition from feedstock until being carbonised and its subsequent reduction.

Carbonised product and volatile production are important in a fixed-bed gasifier due to the low heat rate (<100°C/min) and the solids' long residence time. The organic matter's thermal behaviour is frequently studied by thermogravimetric analysis (TGA) measuring a sample's weight loss rate regarding time and temperature. The TGA only provides a semi-quantitative analysis of pyrolysis because weight loss rates are related to time, temperature and a particular sample's size and density, thereby leading to adjusting the main equation as follows:

$$\frac{dV}{dt} = -KV \tag{1}$$

$$\frac{dV}{dt} = -K \frac{V}{HR} \tag{2}$$

where *t* is time, *K* constant rate equal to $A \exp(-E/RT)$, *A* is the pre-exponential factor, *E* the activation energy, *R* the universal gas constant, *V* total volatile material at temperature *T*, and *HR* the heating rate equal to dT/dt . The equation may even estimate the decomposition rate of the cellulose present in the biomass, over a range of low rates of heating. The analysis cannot predict the variation of the carbonised formation and the gaseous products in different pyrolysis conditions (Sierra et al., 2009).

Table 1. Basic gasification reactions (Sierra, 2006)

Reaction	Formula	Process	ΔH kJ/mol
1 Heterogeneous Oxidation	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	Combustion	-393
	$C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$	Incomplete Combustion	-110
2 Equilibrium Heterogeneous Reaction	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$	Bouduard	+172
	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	Water-gas Heterogeneous Reaction	+131
	$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$	Hydrogen Gasification	-75
3 Homogeneous Oxidation	$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$	CO Oxidation	-283
	$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$	Metanation	-206
	$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$	Hydrogen Gasification	-242
	$CH_4 + \frac{3}{2}O_2 \rightarrow CO + 2H_2O$	Metane Gasification	-519
4 Equilibrium Homogeneous Reaction	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	Water-gas Reactions	-41
	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$		-206

Table 1 gives a summary of the basic reactions driving gasification.

En español

In English

Metodología de la investigación

Del proceso es posible medir la concentración de dióxido de carbono (CO_2) y el monóxido de carbono (CO) en porcentaje del gas producido, la temperatura en el centro del lecho a lo largo del reactor, el peso del reactor (cuya variación por unidad de tiempo va asociada a la conversión de sólidos en gases) y el caudal de aire suministrado al reactor. En la figura 2 se puede observar el módulo donde convergen las señales digitales de los instrumentos mencionados (con excepción del caudal de aire de entrada, puesto que su señal es análoga), cuya lectura es efectuada por medio de un computador. Tal unidad es, además, donde se prepara el gas síntesis para ingresar en el analizador de gases que mide la concentración de CO y CO_2 .

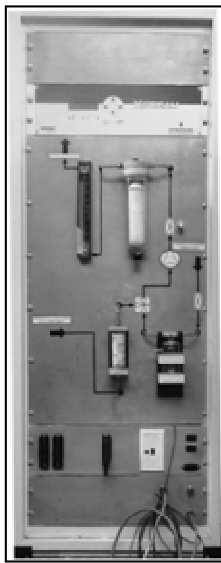


Figura 2. Equipo de medición de parámetros del proceso de gasificación.

La unidad de preparación de gas para el analizador de gases, que se encuentra ubicada en el mismo módulo, contiene un par de filtros que sustraen los remanentes de alquitranes para evitar el taponamiento del instrumento analizador de gases y un regulador de caudal que permite ingresar la cantidad suficiente de gas al analizador.

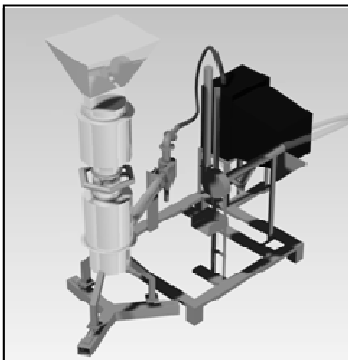


Figura 3. Imagen digital del sistema.

El sistema consta de tres celdas de carga (ubicadas en una estructura en Y que se puede ver en la parte inferior de la figura 3), las cuales permiten revisar la variación de peso del reactor por unidad de tiempo (figura 4). La temperatura a lo largo del lecho

Research methodology

The carbon dioxide (CO_2) and monoxide (CO) concentration in the percentage of gas produced, the temperature in the centre of the bed throughout the reactor, the reactor's weight (whose variation per time unit is associated with solid conversion into gas) and the flow of air supplied to the reactor can all be measured during gasification. Figure 2 shows the module where all the digital signals regarding the aforementioned instruments converge (except for inlet air flow because its signal is analog); the reading is done by computer. That unit is also where the syngas is cleaned to enter the gas analyser equipment which measures the CO and CO_2 concentration.

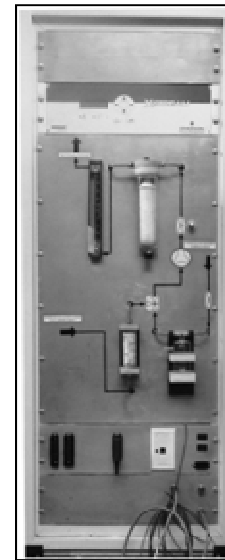


Figure 2. Equipment for measuring gasification parameters

The gas analyser's gas preparation unit is located in the same module; it contains a couple of filters which exclude tar remnants to avoid the gas analyser becoming clogged and a flow regulator that allows enough gas to enter the analyser.

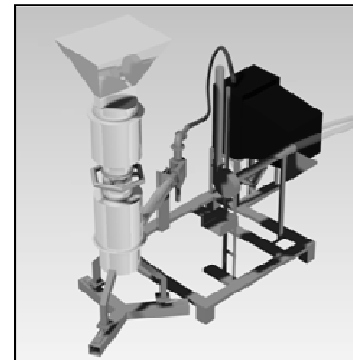


Figure 3. Digital image of gasification

The system consisted of 3 load cells (located in a Y structure which can be observed at the bottom of Figure 3) which allowed reviewing reactor weight variation per time unit (Figure 4). The temperature throughout the bed could be checked through a

En español

puede ser revisada mediante una serie de termocuplas instaladas en el reactor (figura 5). Las señales de estos instrumentos son digitales y se leen por medio de un computador. Por otro lado, está el instrumento que mide el caudal de aire de entrada, cuya señal es análoga (figura 6).

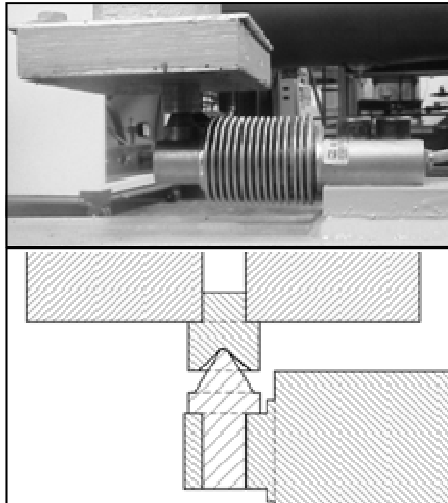


Figura 4. Carga del reactor sobre las celdas.

In English

series of thermocouples installed in the reactor (Figure 5). A computer read these instruments digital signals whilst the instrument measuring inlet air flow read analogue signals (Figure 6).

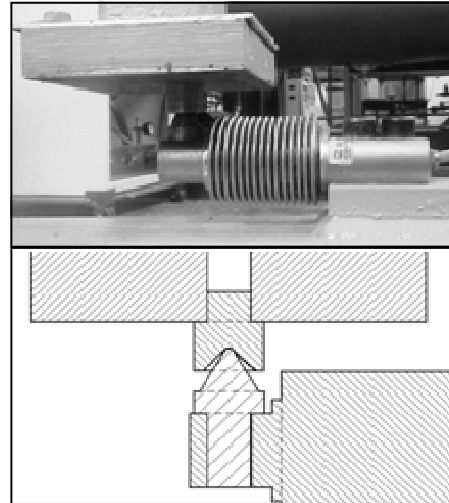


Figure 4. Loading the reactors over the cells

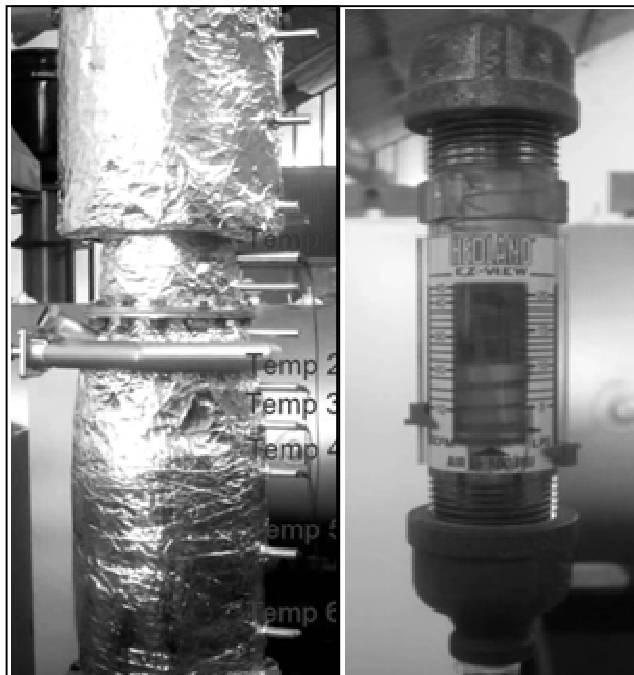


Figura 5. Disposición de termocuplas en el reactor.

Figura 6. Ubicación de entrada de aire y medidor de caudal.

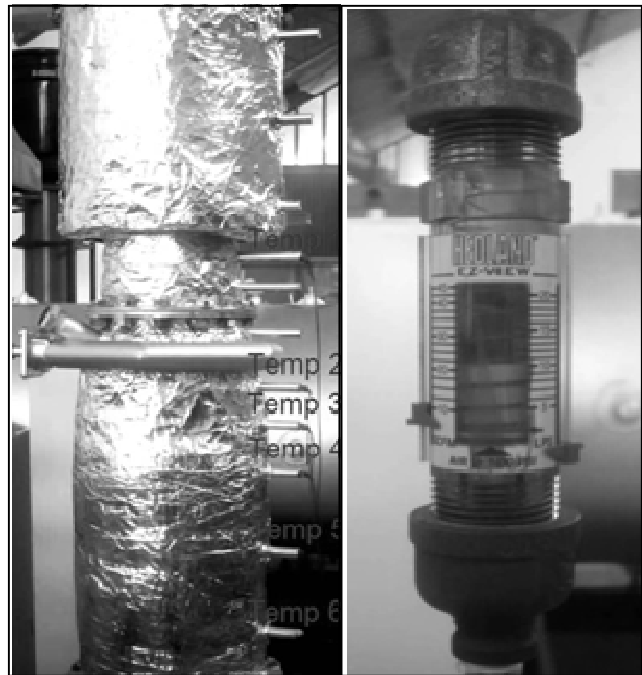


Figure 5. Thermocouple arrangement in the reactor

Figure 6. Air inlet and flow meter location

Para las gasificaciones realizadas en el equipo de laboratorio se utilizaron biomásas como madera residual y residuos de cacao, coco y café (figura 7). Cada materia prima utilizada tuvo características particulares en cuanto al proceso, producción de gas y alquitranes. Aunque todas generan un buen gas combustible si existen diferencias significativas que permitan concluir que unas son mejores que otras, en este caso en especial se encontró que la cascarilla de café es una buena biomasa para ser gasificada, por su tamaño de partícula, que no requiere preparación, y por

Biomass such as wood, cocoa waste, coconut and coffee was used for the gasification carried out in the laboratory equipment (Figure 7). Each feedstock used had particular characteristics regarding the process, gas and tar production. Although they all generated a good combustible gas there were significant differences leading to conclude that some were better than others: It was found that the coffee husks were good biomass for gasification because their particle size did not require preparation and they involved low tar production.

En español

In English

su baja producción de alquitranes.



Figura 7 . Biomasa utilizada para gasificación.

Uno de los materiales más comunes para realizar gasificación es la madera residual por su fácil consecución, en las figuras 8 y 9 se muestran los datos obtenidos para una de las gasificaciones de madera residual llevadas a cabo. La primera de ellas muestra los cambios temporales en las mediciones de temperatura y la segunda los de composición del gas producido y peso del lecho.

Resultados y análisis

En la figura 8 se puede notar que la mayor temperatura es medida en la termocupla 3, zona donde se presenta la combustión que sostiene el proceso. Es posible observar que la temperatura disminuye a medida que la medición se aleja de la zona mencionada, además el comportamiento de la temperatura comienza a ser un poco más lineal. El decremento en la temperatura a medida que se desciende en el reactor es debido a la presencia de reacciones endotérmicas que absorben calor en estas zonas. También es posible constatar que la temperatura en las zonas superiores a la de combustión es muy baja, notablemente más que en las zonas inferiores, debido al tipo de funcionamiento del reactor, pues al ser de flujo paralelo los gases calientes provenientes de la combustión fluyen en el mismo sentido de la biomasa, es decir, hacia la parte inferior, evitando que un buen calentamiento por convección se haga presente en la parte superior. Asimismo, el calentamiento por conducción es muy pobre, puesto que la madera residual, al igual que la mayoría de las biomásas, tiene un coeficiente de conducción muy bajo, impidiendo que el calor fluya libremente a través del contacto entre partículas sólidas.

La figura 9 muestra los resultados de la gasificación, considerados aceptables por presentar un mayor porcentaje de monóxido de carbono respecto del CO_2 en el gas de síntesis producido en la fase de estabilización del proceso de gasificación. Sin embargo, al analizar los resultados obtenidos para el dióxido de carbono se encuentran valores que son altos y deberían ser disminuidos. Es posible que la gasificación se haya hecho con un flujo de aire lo suficientemente alto como para oxidar totalmente una parte importante del carbono presente en la biomasa; tal hipótesis se refuerza al notar el incremento en porcentaje de CO y el consecuente decremento de CO_2 al final del proceso, indicando que al disminuir el suministro de aire con el propósito de apagar



Figure 7. Biomass used for gasification

Wood is one of the most common materials for gasification because it is easily obtained. Figures 8 and 9 show the data obtained for a wood-based gasification. The first shows the temporary changes in temperature measurement, the composition of the gas so produced and the bed weight.

Results and Analysis

Figure 8 shows that the highest temperature was measured by thermocouple 3, which is the area where combustion occurred. It can be seen that temperature decreased as measurement moved away from the aforementioned area and temperature pattern began to become a bit more linear. Temperature decreased as the biomass moved down the reactor due to the presence of endothermic reactions which absorbed heat in these areas. Temperatures in the upper combustion areas had a very low temperature, significantly lower than the lower areas, due to the reactor's operation type. This was because parallel flow equipment means that the hot combustion gases flow in the same way as the biomass, to the bottom part, thereby avoiding good convection heating becoming present at the top. Conduction heating was very poor because wood, being the major part of the biomass, has a very low conduction coefficient, stopping the heat flowing freely through the contact between the solid particles.

Figure 9 shows that the gasification results were good, because there was a good carbon monoxide percentage in the syngas so produced at the end of the gasification (around 20%). However, the carbon dioxide results were higher when they should have become decreased. It is possible that the gasification was done with an air flow high enough to fully oxidise an important part of the carbon present in the biomass. Such hypothesis was reinforced by noting the increase in CO percentage and consequent CO_2 reduction at the end of the process, indicating a decreased air supply (aimed at shutting down the reactor) involving less complete combustion reactions and the carbon reacted with a larger amount of oxygen. Regarding the variation in reactor

el reactor se produjeron menos reacciones de combustión completa y el carbono reaccionó con mejor cantidad de oxígeno. Por otra parte, existe la variación del peso del reactor por unidad de tiempo, donde es interesante observar los saltos que presenta el gráfico; dichas variaciones bruscas se atribuyen a las agitaciones que se aplicaron al equipo de forma periódica con el objetivo de evitar el atascamiento de la biomasa en su interior.

weight per time unit, it was interesting to see the breaks in the graph where such abrupt variations were attributed to the periodic shaking aimed at avoiding the biomass clogging inside the gasifier.

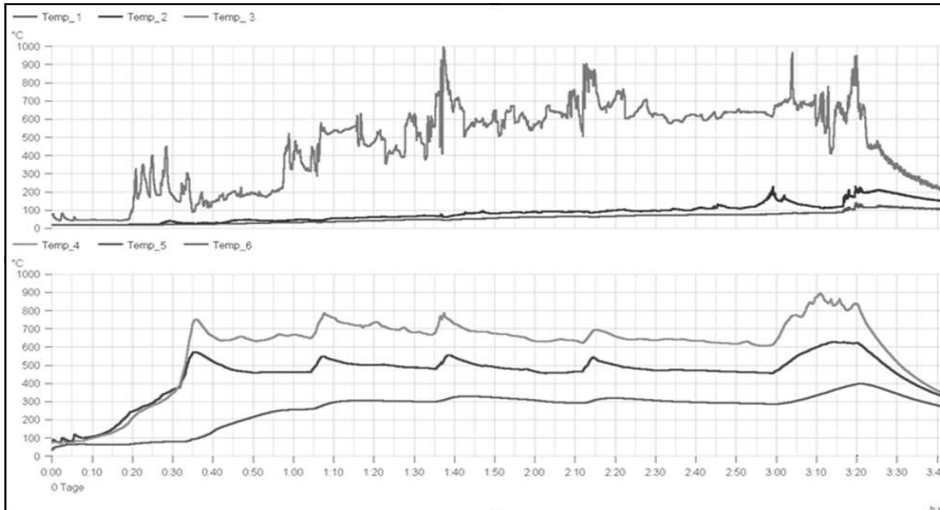


Figura 8. Variación de las temperaturas en el tiempo para gasificación de madera residual.

Figure 8. Temperature plotted against time for wood gasification

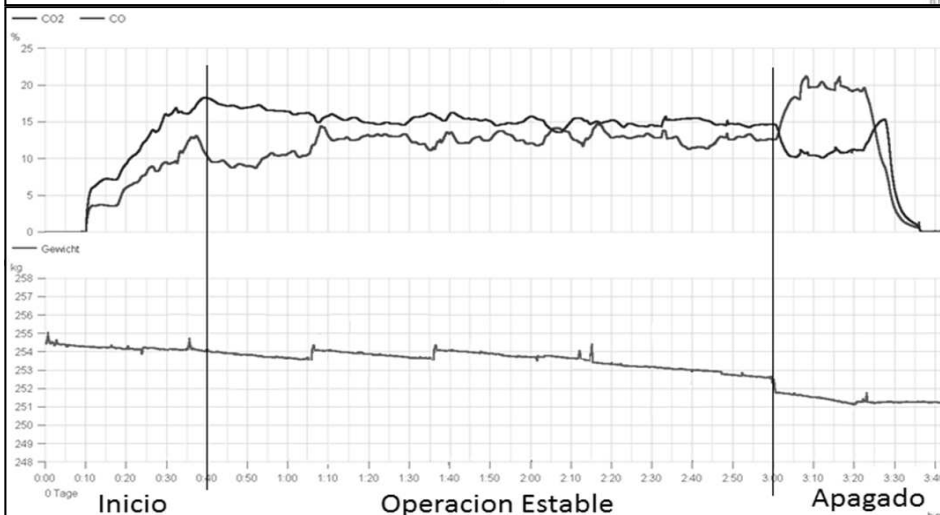


Figura 9. Variaciones de la composición del gas de síntesis y del peso en el reactor en el tiempo para gasificación de biomasa.

Figure 9. Variations in syngas composition and weight in the reactor regarding biomass gasification time

Conclusiones

Como se puede observar, el proceso de gasificación en el equipo produce un gas de calidad aceptable por tener un porcentaje mayor de CO que de CO₂ en la etapa de estabilización lograda al final del proceso, con un porcentaje del 20% de monóxido comparado con 10% de dióxido.

Mientras menor sea la humedad de la biomasa, se puede conseguir una mejor calidad de la gasificación porque el agua en la biomasa disminuye la temperatura de la combustión y aumenta la cantidad de alquitranes producidos.

La temperatura influye notablemente en la tasa de gasificación; así, una temperatura muy alta en la zona de combustión tendrá tasas muy altas de gasificación, y viceversa. Esto se puede observar en el gráfico de variación de peso.

Conclusions

Gasification in the equipment used here produced good quality gas because it was combustible and achieved a good amount of carbon monoxide and low carbon dioxide at the proper temperature;

Better gasification quality could be achieved when biomass humidity was lower because the water in the biomass decreased the combustion temperature and increased the amount of tar produced;

Temperature was a significant influence on gasification rate, i.e. a high temperature in the combustion area would have a higher combustion rate and vice versa (this can be seen on the weight change graph); and

En español

Puesto que el producto de la gasificación es un combustible que puede ser quemado en sistemas de combustión existentes y las investigaciones en este campo son prometedoras, se espera que en los próximos años sus desarrollos permitan llegar a obtener sistemas de gasificación comerciales en Colombia que faciliten producir energía a un costo razonable, como ha venido sucediendo en otros países, donde ya es posible encontrar comercialmente equipos con sistemas de gasificación integrados. Estos sistemas integrados (Treviño, 2008), presentan la ventaja de poder utilizar carbones ricos en azufre.

Referencias / References

- Ahmed, I., Gupta, A.K., Syngas yield during pyrolysis and steam gasification of paper., *Journal of Applied Energy*, Vol. 86, 2009, pp. 1813–1821.
- Comisión Social Consultiva-Universidad de la Republica., *Situación Actual., Perspectivas y Alternativas Energéticas para el Uruguay.*, Informe Final, 2004.
- Dogru, M., Howarth C .R., Akay, G., Keskinler, B., Malik, A.A., Gasification of hazelnut shells in a downdraft gasifier., *Journal of Energy*, Vol. 27, 2002, pp. 415–427.
- Dogru, M., Howarth C.R., Akay, G., Keskinler, B., Malik, A.A., Gasification of hazelnut shells in a downdraft gasifier., *Journal of Energy*, Vol. 27, 2002, pp. 415–427.
- Jorapur, R. M., Rajvanshi, A. K., Development of a Sugarcane Leaf Gasifier For Electricity Generation., *Journal of Biomass and Bioenergy*, Vol. 8, 1995, pp. 91-98.
- Lora, E.S., Andrade, R.V., Biomass as energy source in Brazil., *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, 2009, pp. 777–788.
- Min, T.J., Yoshikawa, K., Murakami K., Distributed gasification and power generation from solid wastes., *Journal of Energy*, Vol. 30, 2005, pp. 2219–2228.
- Sharma, A. K., Experimental study on 75 kWth downdraft

In English

The gasification product was a fuel which could be burned in actual combustion systems. Recent research in this field has been hopeful; it is expected that developments in the near future will allow commercial gasification systems in Colombia to produce low-cost energy, as has been happening around the world where equipment having integrated gasification systems can be found (Treviño, 2008). These integrated systems have the advantage that they can use low-quality fuels like sulphur-rich coal which involves a high environmental cost when being used.

- (biomass) gasifier system., *Journal of Renewable Energy*, Vol. 34, 2009, pp. 1726–1733.
- Sheth, P.N., Babu, B.V., Experimental studies on producer gas generation from wood waste in a downdraft biomass gasifier., *Journal of Bioresource Technology*, Vol. 100, 2009, pp. 3127–3133.
- Sierra, F. E., Guerrero, C. A., Ramírez, S., *Procesos de Gasificación de Materiales Orgánicos.*, Asociación de Ingenieros Mecánicos de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2009.
- Sierra, F. E., Klose, W., Producción de Gas combustible a partir de biomasa en un Horno Rotatorio., *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo*, Vol. 3, 2008.
- Sierra, F. E., *Zurkatalytischen Vergasung von Biomasse.*, Universität Kassel, PhD. Disertación, 2006.
- Suresh P., Babu, Observations on the current status of biomass gasification., *IEA Bioenergy*, Marzo de 2005.
- Treviño-Coca, M., *Tecnología de Gasificación Integrada en Ciclo Combinado GICC.*, Club Español de Energía. ELCO-GAS S.A., 2008
- Zainal, Z.A., Rifau, A., Quadir, G.A., Seetharamu, K.N., Experimental investigation of a downdraft biomass gasifier., *Journal of Biomass and Bioenergy*, Vol. 23, 2002, pp. 283-289.