

# CARACTERIZACIÓN DEL GAS DE SÍNTESIS OBTENIDO A PARTIR DE ALGARROBO Y BAGAZO DE CAÑA

## CHARACTERIZATION OF GAS OBTAINED WITH THE ALGARROBO AND SUGARCANE BAGASSE

## CARACTERIZAÇÃO DE GÁS COM ALGARROBO E BAGAÇO DE CANA

GERARDO CABRERA<sup>1</sup>, SANTIAGO MADRIÑAN<sup>2</sup>, DEYANIRA MUÑOZ<sup>3</sup>

### RESUMEN

*Se gasificó biomasa de madera y carbón del algarrobo (árbol autóctono del Valle geográfico del río Cauca) y del bagazo de caña. De la gasificación separada de cada una de ellas se obtuvo gas de síntesis, el cual se refinó y se caracterizó químicamente. Se determinó la eficiencia del proceso y del equipo mediante los balances de masa y energía. Se obtuvo un poder calorífico superior de 4 MJ/Nm<sup>3</sup>, mostrando su potencial como combustible en motores de combustión interna. Se concluye que la madera presenta la mejor eficiencia del 77% en comparación al 71% y 70% del bagazo y del carbón respectivamente.*

### ABSTRACT

*Wood biomass, carob coal (made from an autochthonous tree of the Cauca river valley) and cane bagasse were gasificated. From the separate gasification of each of them, synthesis gas was obtained, which was refined and chemically characterized. The efficiency of the process and of the equipment was determinate by an evaluation*

**Recibido para evaluación:** 09/03/2011. **Aprobado para publicación:** 16/03/2012

- 1 Msc. Ingeniero mecánico. Facultad de Ingeniería. Universidad del Valle
- 2 Ingeniero mecánico. Facultad de Ingeniería. Universidad del Valle
- 3 Msc. en Ingeniería, énfasis ingeniería Sanitaria y Ambiental. Universidad del Cauca

**Correspondencia:** gcabrera14@hotmail.com

*of the mass and energy balance. A calorific power up to 4 MJ/Nm<sup>3</sup> was obtained showing its potential as fuel in internal combustion engines. It is concluded that the wood presents the best efficiency of 77% compared to 71% of bagasse and 70% of coal.*

## RESUMO

*Biomassa de madeira, carvão de alfarroba (feito a partir de uma árvore autóctone do rio Cauca vale) e bagaço de cana foram gasificadas. A partir da gaseificação separada de cada um deles, gás de síntese foi obtido, que foi refinado e caracterizados. que a eficiência do processo e do equipamento foi determinada por uma avaliação da massa e do balanço de energia. Um poder calorífico até 4 MJ/Nm<sup>3</sup> foi obtido a exibir o seu potencial como combustível em motores de combustão interna. Concluiu-se que a madeira apresenta a melhor eficiência de 77% em comparação com 71% de bagaço e 70% de carvão.*

## INTRODUCCIÓN

La gasificación de biomasa se vió favorecida en la época de las guerras mundiales en Europa, dada la escasez de petróleo [1]. Pasada la segunda guerra su utilización se abandonó casi por completo, siendo retomada actualmente al vislumbrarse el agotamiento de las reservas energéticas a nivel mundial [2]. En la India la gasificación se ha vuelto a utilizar para la generación de energía y para la combustión en algunos procesos industriales [3].

América Latina y Colombia en particular ( ) tienen una inmensa frontera agrícola con terrenos fértiles pero deficientemente utilizados [4]. Una de las causas es que no cuentan con suministro de energía mecánica y eléctrica indispensables en el mejoramiento de la tecnología en el campo.

La gasificación de biomasa es una tecnología viable y por lo tanto aplicable en cualquier lugar con disponibilidad de biomasa vegetal. Permite generar energía de forma descentralizada o distribuida, como una alternativa prometedora para lugares remotos

La calidad y uso del gas obtenido de un gasificador depende de los compuestos orgánicos condensables presentes en él. Para gasificadores se establece: Por encima de 5000 mg de alquitranes por metro cúbico de gas en condiciones normalizadas a 1 atm, y 15°C (5000 mg/Nm<sup>3</sup>) puede ser usado como combustible en diferentes aplicaciones, al reducir el nivel de alquitranes por debajo de 10 mg/Nm<sup>3</sup>, mediante sistemas de limpieza, se puede usar en motores.

### PALABRAS CLAVES:

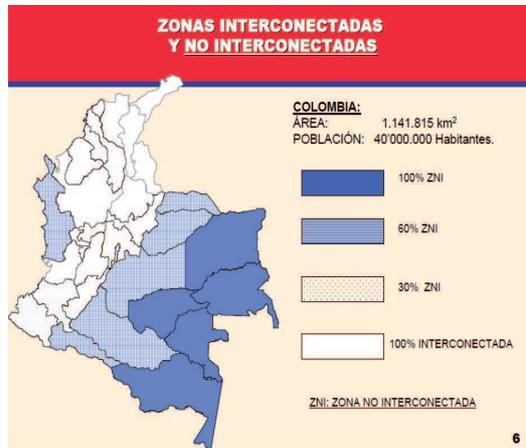
Gasificación, Biomasa, Combustible

### KEYWORDS:

Gasification, Biomass, Fuel

### ALAVRAS CHAVE:

Gás de gaseificação,  
A biomassa, Combustível,

**Figura 1.** Zonas sin suministro de energía

Teniendo en cuenta que mediante la gasificación es posible aprovechar todo el potencial energético de la biomasa vegetal como madera y desechos agrícolas de forma sostenible, es de interés evaluar la madera de algarrobo como biomasa para su gasificación y aprovechamiento energético. Lo cual contribuye al mejoramiento de la plataforma tecnológica rural porque posibilita la generación de energía de forma distribuida y de manera sostenible [5].

El objetivo principal de este trabajo es obtener un gas combustible a partir de algarrobo (*Prosopis juliflora*) y bagazo de caña con propiedades que le permitan ser utilizado en motores de combustión interna. De esta forma, es posible la generación de energía útil de manera distribuida.

El trabajo se desarrolló como proyecto del Grupo de Investigación en Desarrollo y Difusión de Tecnologías Alternativas GDDTA, del Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles en Producción Agropecuaria CIPAV y de la Fundación UTA.

La estructura del trabajo consistió en valorar la mejor forma de obtener el gas y luego caracterizarlo. Las actividades realizadas fueron: caracterizar y adecuar la biomasa, establecer las condiciones de operación del reactor con base a las de diseño, realizar las pruebas físico químicas, control de temperatura, determinar de composición de gases, balances de masa y energía, evaluar la gasificación de biomasa con el poder calorífico y eficiencias de conversión.

## MÉTODO

Teniendo disponible un reactor de prueba tipo Imbert (figura 2) que se caracteriza por ser de flujo descendente, que garantiza un contenido de alquitranes inferior a los gasificadores de tiro directo; se trabajó con el árbol de algarrobo, común en muchas zonas de América y en Colombia, donde se usa en posteadura, ebanistería y producción de carbón [6].

Los materiales (biomasa) utilizados para el desarrollo de este trabajo fueron: el algarrobo por su alta densidad y poder calorífico y el bagazo de caña, un subproducto de la industria azucarera del Valle del Cauca, zona utilizada para el cultivo.

Inicialmente, para cuantificar la producción de gas se caracterizó la biomasa. Así, del manual de operación del reactor se definió el tamaño de partícula apropiado, equivalente a un cubo de 5 cm de lado [7].

Estas muestras se secaron a la atmósfera hasta obtener una humedad inferior al 20%. Utilizando el diagrama de Ellingham (figura 3) [8] se determinó la temperatura óptima de operación del reactor de 1050°C.

Posteriormente, se retiró del gasificador los residuos de operaciones anteriores. Luego se realizó el pesaje de los materiales: 51 Kg de madera, 41 Kg de carbón de algarrobo y 16 Kg de bagazo. Se introdujo las biomásas separadamente y se pusieron en marcha el ventilador, agitador, retirador de cenizas y la bomba de agua. Para iniciar la prueba se encendió la instalación de gasificación (figura 4).

La entrada de aire se fue regulando en el transcurso de la prueba, empezando con 50% hasta alcanzar la cantidad correspondiente a la temperatura óptima (1050°C). La cual se midió con una termocupla tipo k.

### Caracterización del gas pobre obtenido en el gasificador de pruebas.

En el proceso de caracterización del gas se determinaron los porcentajes de: CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y los hidrocarburos con el analizador de gases (figura 5).

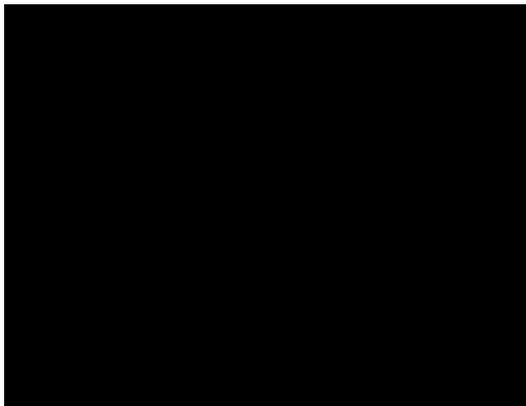
Para llevar a cabo la caracterización, el gas de síntesis es tomado por una sonda, posteriormente se hace pasar

**Figura 2.** Gasificador de prueba

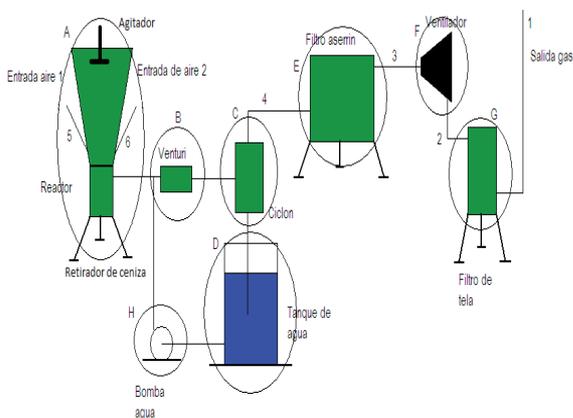


Fuente: Autorización, Reserva Natural Pozo Verde, Jamundi-Valle

**Figura 3.** Diagrama de Eilingham



**Figura 4.** Instalación de prueba para gas



**Figura 5.** Analizador de gases



por unos filtros retenedores de humedad, para luego ser conducirlos a una célula de medición. En la célula una haz de rayos infrarrojos generada por el transmisor se envía a través de los filtros ópticos sobre los elementos de medición, los gases presentes en la célula absorben los rayos de acuerdo a su concentración en diferentes longitudes de onda, únicamente los gases de moléculas conformadas por un mismo tipo de átomo no pueden ser diferenciadas, para lo cual el analizador cuenta con un sensor de tipo químico para determinar la concentración de  $O_2$ .

Mediante balances de masa [9] se determinaron:  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $SO_2$  y el  $N_2$ . Para realizar estos balances adecuadamente, la cantidad de biomasa fue pesada antes de ser introducida al gasificador, de igual manera se pesaron las cenizas y los inquemados después de realizadas las pruebas. La cantidad de aire se estimó mediante un balance de masa al conocer la cantidad de humos a la salida del gasificador.

La cantidad de humos se midió indirectamente con las presiones estáticas y de estancamiento que fueron obtenidas con la ayuda de un tubo Pitot, para posteriormente calcular la presión dinámica y conociendo el área transversal de la tubería calcular el flujo volumétrico. El flujo másico se obtiene mediante la densidad del gas a la presión de prueba.

El analizador de gases mide únicamente  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$  y  $HC$  ( $C_6H_8$ ) entonces se realizaron algunas suposiciones para poder llevar a cabo el balance de masa.

El balance de masa para el carbono se termina cuando se conoce la cantidad de inquemados al final del

**Figura 6.** Analizador de gases

proceso, para los cuales se asume una composición 100% carbono, por lo tanto el déficit de carbono de acuerdo con el análisis elemental de la materia prima se debe a la formación de  $\text{CH}_4$  en el gas de síntesis (se desprecia la presencia de polvo y cenizas arrastradas por el gas).

El balance de masa del hidrógeno se cuantificó conociendo la humedad del gas, la cual se determinó mediante la temperatura de bulbo húmedo, bulbo seco y una carta psicométrica, calculando de este modo la cantidad de  $\text{H}_2\text{O}$  y vapor, presente en el gas, la cantidad de HC también se conoce y previamente se ha calculado la cantidad de  $\text{CH}_4$ , por lo tanto el déficit de hidrogeno corresponde a la presencia de  $\text{H}_2$  en el gas de síntesis.

Para el caso del azufre se asumió una combustión completa, suposición que no afecta de forma importante los resultados dada la baja cantidad de azufre en las materias primas a evaluar. Además se supuso que el nitrógeno no reacciona, por lo tanto sale en el gas de síntesis como  $\text{N}_2$  (el analizador de gases también podía determinar la cantidad de  $\text{NO}_x$ , pero la cantidad era demasiado pequeña, ppm, como para tenerse en cuenta)

La presión a la cual se midieron la composición de los gases se determinó con el equipo Bacharach PCA 35 (figura 6), conocer la presión es importante para determinar la densidad del gas.

## RESULTADOS

Considerando que un gas producido de la biomasa es útil si su poder calorífico superior, es mayor a

**Cuadro 1.** Caracterización de la biomasa

	Madera	Carbón	Bagazo
<b>Análisis próximo (%)</b>			
Humedad	12.03	7.87	16.03
Cenizas	2.82	11.99	5.41
Carbono	46.62	74.00	43.48
Hidrógeno	5.73	2.33	5.10
Nitrógeno	0.20	0.40	0.85
Azufre	0.08	0.23	0.10
Oxígeno	32.52	3.18	29.03
<b>Análisis Elemental (%)</b>			
Humedad	12.03	7.87	16.03
Materia Volátil	70.65	17.20	69.71
Cenizas	2.82	11.99	5.41
Carbón Fijo	14.50	62.94	8.85
Poder calorífico(BTU/Lb)	7024	11136	6999
Azufre	0.08	0.23	0.10

**Cuadro 2.** Caracterización química del gas

Gases (%)	Madera	Carbón	Bagazo
$\text{CO}_2$	10.1097	11.0594	13.6929
$\text{CO}$	13.1426	18.9757	13.6929
$\text{H}_2\text{O}$	9.4096	2.9591	10.7043
$\text{SO}_2$	0.0093	0.01848	0.0146
$\text{C}_6\text{H}_8$	0.0404	0.0029	0.1475
$\text{O}_2$	12.1316	1.51334	4.21321
$\text{H}_2$	8.8377	4.2979	13.9140
$\text{CH}_4$	4.5623	1.4925	4.1247
$\text{N}_2$	41.7568	59.6806	39.4970
Poder Calorífico MJ/ $\text{Nm}^3$	4.2349	3.3851	4.69074

**Cuadro 3.** Relación entre poderes

Combustible	% Eficiencia en frio
Madera de Algarrobo	77
Carbón Vegetal de Algarrobo	70
Bagazo de caña	71

**Cuadro 4.** Relación gas /aire

Biomasa	Relación Aire/combustible	%aire para combustión completa	Rendimiento N.m <sup>3</sup> /kg
Madera de Algarrobo	2	35	3
Carbón Vegetal de Algarrobo	4.2	45	5.2
Bagazo de caña	1.5	42	2.5

4MJ/Nm<sup>3</sup>. El poder calorífico se calculó con base a la composición química del gas, es decir teniendo en cuenta las fracciones volumétricas de cada uno de los gases componentes y su poder calorífico superior.

El gas obtenido en esta investigación cumplió suficientemente este límite, en el caso de la madera se alcanzó un 106%, en el carbón un 85% y en el bagazo de caña de azúcar un 117% del valor recomendado.

El algarrobo (*Prosopis Juliflora*) es un árbol común de madera dura [10], muy usado para producir carbón de buena calidad. Estas características lo mostraron como buen candidato para la gasificación. La caña de azúcar inunda la geografía del Valle del Cauca lo que también motivó a gasificarlo. Para realizar los cálculos pertinentes al proceso se necesitaron las características de la biomasa (cuadro 1) y las del gas producido por ésta (cuadro 2) reportadas como porcentajes molares. Según el análisis de caracterización del gas se concluye que el gas del bagazo tiene el mayor poder calorífico siendo menor el del carbón, porque en el proceso de carbonización se desprenden gases combustibles.

Los resultados muestran que aun gastando más energía en el fraccionamiento de la madera que en el carbón, la diferencia de sus poderes caloríficos es

de 0,7 MJ/N.m<sup>3</sup>, valor relativamente pequeño lo cual justifica el uso del carbón vegetal del algarrobo. Sin embargo, la comparación de la eficiencia en frio del sistema entre los poderes caloríficos del gas y de la biomasa suministrada, registrada en el cuadro 3, indica la conveniencia de usar la madera del algarrobo.

Para el caso de los gasificadores se puede evaluar el rendimiento en base a una eficiencia en frio o en caliente, la diferencia entre las dos radica en el hecho de que la eficiencia en frio no involucra el calor sensible presente en el gas de síntesis a la salida del gasificador.

Cuando el gas se va a utilizar en un motor de combustión interna interesa únicamente la eficiencia en frio puesto que el gas debe ser enfriado antes de ingresar al motor para mejorar la eficiencia volumétrica en el llenado de los cilindros.

Lo anterior se confirma al comparar los resultados de la relación entre gas combustible producido y aire suministrado (cuadro 4), teniendo en cuenta que 4 kilogramos de madera son necesarios para producir 1 kilogramo de carbón lo que obliga, al hacer la comparación, a multiplicar por cuatro el rendimiento de la madera.

## CONCLUSIONES

El gas producido de la biomasa de algarrobo presentó un poder calorífico con un contenido energético por encima de 4MJ/N.m<sup>3</sup> (100 Btu/ft<sup>3</sup>) que es límite para considerarlo útil como gas combustible para motores.

La biomasa usada en la investigación, indica que la madera de algarrobo, es la adecuada en la producción de gas. Se obtuvo para la madera una eficiencia del 77% mayor en comparación con el 71% para bagazo y 70% para carbón. La tecnología de gasificación usando algarrobo como biomasa se puede implementar en toda América latina ya que es comprobado que este árbol es común en su geografía [12].

## AGRADECIMIENTOS

A la Fundación CIPA, a La Fundación UTA de Colombia, a la Universidad del Valle por la participación del Grupo

de Investigación en Desarrollo y Difusión de Tecnologías Alternativas GDDTA y a la Universidad del Cauca por la participación del Grupo de investigación en Diseños, procesos y Energía.

## REFERENCIAS

- [1] ESTRADA, A. y ZAPATA, A. Gasificación de biomasa para producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor. *Scientia et technica* año x UTP, 25 (8), 2004
- [2] ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN. El gas de madera como combustible para motores. Estudio FAO Montes 72, Subdirección de Productos no Madereros y Energía; Subdirección de Industrias Madereras. Roma: 1993.
- [3] MARTINEZ M. Provisión de servicios energéticos básicos de Loyola School en India. [Proyecto de fin de carrera]. Madrid: Universidad Pontificia Comillas, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, 2008.
- [4] KALMANOVITZ, S. y LÓPEZ, E. Instituciones y desarrollo agrícola en Colombia a principios del siglo XX (parte II), *La Agricultura Colombiana en el Siglo XX.*, 2002.
- [5] OÑATE, D. Gasificación de biomasa. Una simbiosis del futuro [online]. Available: [http://www.torresrefrigeracion.com/pdf/art\\_gas\\_026.pdf](http://www.torresrefrigeracion.com/pdf/art_gas_026.pdf) [citado 19 enero de 2011].
- [6] RIBASKI, J. Potencial de Algarrobo (*Prosopis juliflora*) en sistemas silvopastoriles en el semiárido de Brasil. Memorias de la segunda conferencia electrónica. Centro de Investigación Forestal Colombo, Paraná, Brasil: 2000, 2001.
- [7] ANKUR SCIENTIFIC ENERGY TECHNOLOGIES PVT. LD. Manual de usuario. India: 1995.
- [8] ELLINGHAM DIAGRAM. [online]. Available: <http://www.answers.com/-topic/ellingham-diagram-1> [Citado 11 de septiembre de 2010].
- [9] CENGEL, Y. y BOLES, M. *Termodinámica*, 6 ed México: Mc Graw Hill, 2008.
- [10] ALGARROBO. (*Prosopis Pallida*) Generador de vida en el desierto. [Online]. Available: [http://www.peruecologico.com.pe/flo\\_algarrobo\\_1.htm](http://www.peruecologico.com.pe/flo_algarrobo_1.htm) [Citada 19 de enero de 2011].
- [11] SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL. [online]. Available: [http://tilz.tearfund.org/webdocs/Tilz/Roots/Spanish/Environmental%20Sustainability/ROOTS\\_13\\_S\\_Section%203.pdf](http://tilz.tearfund.org/webdocs/Tilz/Roots/Spanish/Environmental%20Sustainability/ROOTS_13_S_Section%203.pdf). [Citado 19 de enero de 2011].
- [12] ÁRBOL DE ALGARROBA. [online]. Available: [http://www.worldlingo.com/ma/en-wiki/es/Carob\\_tree](http://www.worldlingo.com/ma/en-wiki/es/Carob_tree) [Citado 19 de enero de 2011].