

# Gasificación de bagazo de caña y carbón en planta piloto

Robert José Macías Naranjo,<sup>1\*</sup> Farid Chejne Janna,<sup>1</sup> Jorge Iván Montoya Arbeláez<sup>1</sup>  
y Adriana Blanco Leal<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Departamento de Procesos y Energía, Grupo de investigación Termodinámica Aplicada y Energías Alternativas – TAYEA. Carrera 80 N° 65-223, Medellín, Colombia. \*Autor para correspondencia: rjmacias@unal.edu.co

## Gasification of sugarcane bagasse and coal at pilot plant scale

### Abstract

The test results of coal and sugarcane bagasse gasification in fluidized bed at pilot plant scale are presented in this work. Initially sugarcane bagasse was gasified, then bagasse and coal was co-gasified in a mass ratio of 5:1 and finally coal was gasified. Composition of produced syngas was measured by gas chromatography for each test. Temperature profiles were recorded for each test in order to monitor the behavior of fluidization conditions and calculate the High Heating Value (HHV) of each syngas. It was found that the cogasification with a mass ratio of 5:1 produces the best calorific value (2.28 MJ / kg), thus demonstrating the synergistic effect when two types of raw materials are processed simultaneously.

**Keywords:** Sugarcane bagasse, biomass, coal, cogasification, fluidized bed, energetic potential.

**Editora:** Pataquiva-Mateus, A. Y.

**Citation:** Macías, R. J., Chejne, F., Montoya, J. I. y Blanco, A. (2014). Gasificación de bagazo de caña y carbón en planta piloto. *Revista Mutis 4(1)*; pag. 24-32

**Received:** Abril 2, 2014; **accepted:** Mayo 28, 2014; **Published on line:** Junio 30, 2014

**Copyright:** ©2014 Macías *et al.* This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited

**Competing Interests:** The authors have no conflict of interest.

### Resumen

En este trabajo se presentan los resultados de las pruebas de gasificación de carbón y cogasificación de carbón-bagazo de caña en planta piloto que opera en régimen de lecho fluidizado. Para cada prueba se midió la composición de gas de síntesis producido con cada materia prima, mediante cromatografía de gases; se registraron los perfiles de temperatura para

cada prueba con el fin de evaluar la estabilidad del reactor, las condiciones de fluidización y el poder calorífico de cada gas. Se encontró que la cogasificación del bagazo de caña con carbón a una relación de 5:1 % w/w; produjo el gas con mayor poder calorífico inferior (2,28 MJ/kg), lo que demuestra el efecto de sinergia cuando se procesan de manera simultánea dos tipos de materia prima.

**Palabras clave:** bagazo de caña, biomasa, carbón, cogasificación, lecho fluidizado, potencial energético.

### Introducción

El petróleo es uno de los combustibles fósiles de mayor uso en la actualidad (Rühl, 2013), sin embargo, el desmedido uso del recurso ha impactado en las reservas mundiales y en el ambiente, cuyo uso genera gases de efecto invernadero. De allí la importancia de utilizar recursos con alta disponibilidad en el país



como el carbón, los residuos agroindustriales, forestales y pecuarios; los cuales permiten disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera (IDAE, BESEL S.A., 2007). A nivel mundial la biomasa ocupa el cuarto lugar como fuente energética aportando cerca del 14% del consumo energético (Alaud et al., 2010).

La gasificación de biomasa y carbón (BC) es un proceso termoquímico en el que es transformado el material carbonoso en un gas combustible, mediante reacciones que ocurren a temperaturas superiores a los 800 °C en presencia de un agente gasificante como vapor de agua, entre otros (Higman & Van der Burgt, 2003). La selección del método de gasificación depende de muchos factores como tamaño, tipo de biomasa, agente gasificante y condiciones de operación del gasificador (Gil et al., 1999).

La cogasificación es una de las alternativas promisorias para mitigar la demanda energética sin atender contra el medio ambiente, cuenta con una operación limpia y eficiente que a gran escala ha beneficiado al sector industrial (Gasification Technologies Council), puesto que apoya las necesidades de energía eléctrica y térmica en el sector. Al ser incluida una porción de biomasa, se mejoran aspectos importantes en el proceso como la producción de gas debido al alto contenido de materia volátil que tiene la biomasa (Basu, 2010), el rendimiento, la eficiencia en frío, el poder calorífico debido a las reacciones heterogéneas que se llevan a cabo en el material poroso del biochar (Pinto et al., 2009) y mejora en la conversión del carbón. Así mismo se ha demostrado que la mezcla carbón biomasa mejora la hidrodinámica del lecho y tiene marcada influencia sobre los subproductos de la gasificación disminuyendo la generación de alquitranes Andre et al., 2005). En este trabajo se pretende confirmar la mejora en la producción de hidrógeno implementando el sistema de cogasificación carbón biomasa.

### Gasificadores de lecho fluidizado burbujeante (Bell & Towler, 2011)

Los gasificadores de lecho fluidizado tienen como característica básica un mejor contacto partícula y fluido gasificante, lo cual mejora sustancialmente los fenómenos de transferencia de calor y masa y se logra un mejor control de temperatura. La tecnología es versátil, puesto que se adapta fácilmente a cambios de

biomasa y mejores velocidades de reacción (Naranjo, 2009). Los reactores generalmente cuentan con una placa perforada distribuidora en la parte inferior del reactor, posterior a la entrada del agente gasificante, que permite la distribución de flujo al interior del lecho, como se aprecia en la Figura 1.

En este tipo de equipos es difícil distinguir las regiones en donde se llevan a cabo los diferentes procesos de secado, oxidación y pirólisis. Las partículas son sometidas a estos procesos en cualquier punto del reactor, saliendo finalmente parte de las cenizas por el gas emergente y el resto se acumula en el fondo del lecho.

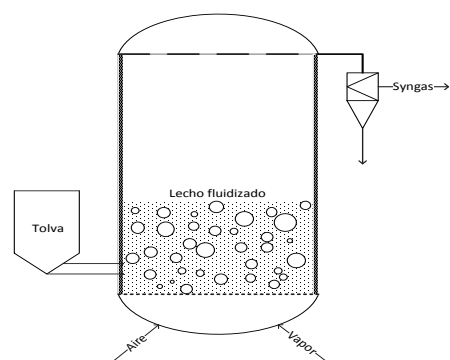


Figura 1. Gasificador de lecho fluidizado burbujeante (Gómez-Barea & Leckner, 2010)

### Reacciones del proceso de gasificación

Dentro del proceso de gasificación se producen múltiples reacciones, de carácter exotérmico y endotérmico, debido a esto las reacciones se compensan unas a otras dependiendo del tipo de reacción. El proceso global se puede modelar mediante las reacciones presentadas en la Tabla 1 (Gómez-Barea & Leckner, 2010).

Tabla 1. Principales reacciones de gasificación

Reacción	$\Delta H_r$ (kJ/kg)
$C + 1/2 O_2 \rightarrow CO$	-9205
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	-32765
$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	14360
$CO + 1/2 O_2 \rightarrow CO_2$	-10105
$C + H_2 O \rightarrow CO + H_2$	10930
$H_2 O + CO \rightarrow H_2 + CO_2$	-6250
$C + H_2 \rightarrow CH_4$	-6230

## Análisis de la biomasa y el carbón

La biomasa es un recurso energético alternativo que ha ido adquiriendo gran importancia debido a la energía química que contiene (Campoy *et al.*, 2014). Esta biomasa abarca todo tipo de materia orgánica renovable y se caracteriza por tener un bajo contenido de carbono, menor al 50%, un alto contenido de oxígeno, mayor al 44% y un alto contenido de volátiles, superior al 85%, formados por hidrocarburos (C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e hidrógeno, además se pueden presentar residuos carbonosos y vapor de agua, y en cantidades más bajas cenizas y azufre. En la Tabla 2 se presenta el potencial energético de algunas biomásas.

**Tabla 2.** Contenido energético de la materia orgánica de diferentes especies

Vegetal	Energía en la materia seca (MJ/Kg)
Maíz	17.8-18.0
Pino	20.0
Cáscara de arroz	13.4-16.1
Bagazo de caña	17.3
Cáscara de coco	17.0-19.0
Estiércol	13.6
Café	16.5-17

Fuente: elaboración propia a partir de Escalante, Orduz, & Zapata, 2011.

El carbón se encuentra compuesto principalmente de carbono, nitrógeno, oxígeno y azufre, este se origina en transformaciones físicas y químicas de acumulaciones vegetales depositadas en ambientes tales como pantanos, lagunares y deltaicos (UPME, 2005). En la Tabla 3 se presentan las características más importantes para los diferentes tipos de carbones.

**Tabla 3.** Clasificación de los carbones

Tipo	Carbono fijo (%)	Material volátil (%)	Contenido de humedad (%)	Poder calorífico (MJ/KG)
Antracita	86-98	1	< 15	>32.6
Bituminoso	45-86	32	15-20	24.5-32.6
Sub-bituminoso	35-45	50	20-30	18.2-24.5
Lignito y Turba	25-35	96	>30	9.3-18.2

Fuente: elaboración propia a partir de UPME, 2005.

## Materiales y métodos

En la Figura 2 se presenta el diagrama del gasificador autotérmico utilizado para los diferentes ensayos, objeto del presente trabajo. El reactor tiene un diámetro interno de 0,22 m y una altura de 4 m cubierto por una capa de 10 cm de cemento refractario. En la parte inferior tiene una placa de distribución con 142 agujeros de 1 mm de diámetro en arreglo triangular. El gasificador cuenta con un revestimiento de fibra cerámica de 15 cm de espesor. A una distancia de 100 cm arriba de la placa de distribución posee una válvula donde periódicamente se extraen cenizas mediante rebose para mantener el volumen de sólidos constante y para su posterior análisis. La temperatura del reactor se monitorea con 6 termopares instalados a lo largo del reactor, los cuales están dispuestos a 0,55 y 1 m de la placa distribuidora, dos más antes del freeboard a 1,6 m y 1,8 m y otros dos termopares ubicados en el freeboard a 2,2 m y 3,3 m.

La alimentación del reactor se realiza mediante un tornillo dosificador ubicado a 30 cm de la placa distribuidora, el tornillo dosificador está calibrado para las mezclas biomasa-caliza, carbón-biomasa y carbón. También posee un segundo alimentador por gravedad situado a 2,2 m de la base del reactor.

## Caracterización de la materia prima

La materia prima fue caracterizada en el Laboratorio de Carbones de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, aplicando las normas ASTM para análisis próximo completo, análisis último y poder calorífico del carbón y bagazo de caña. En las Tablas 4 y 5 se muestran los valores de cada análisis y los métodos empleados para la caracterización del bagazo de caña.

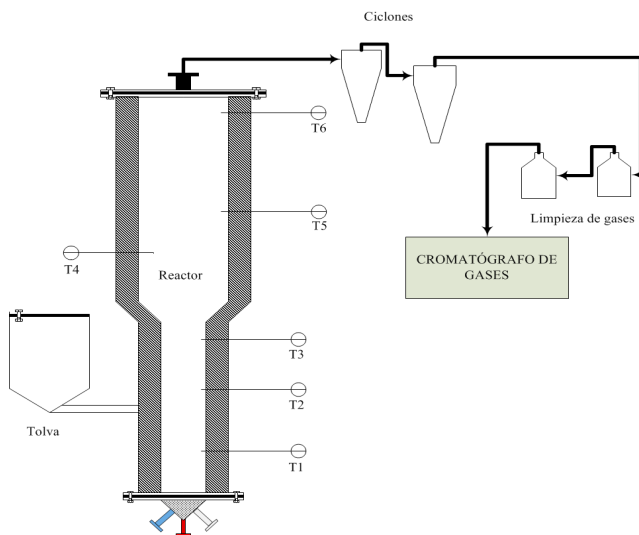


Figura 2. Esquema del gasificador piloto. Fuente: elaboración propia a partir de J. Vélez, 2009.

Tabla 4. Análisis próximo del bagazo de caña (%p/p)

Ensayo	Metodo	Resultado
Humedad residual	ASTM D 7582	7,6%
Cenizas	ASTM D 7582	3,90%
Volátiles	ASTM D 7582	82,55 %
Carbono fijo	ASTM D 7582	8,30%
Azufre total	ASTM D 4239 Método B	0,15%
Poder calorífico	ASTM D 58655	4040 cal/g

Tabla 5. Análisis último del bagazo de caña y contenido de humedad CHNOS

Elemento	%p/p
C	46,6
H	5,92
N	0,14
S	0,09
O	43,35
Humedad mufla	8,39
Balanza Halógena	9,01

El carbón utilizado es procedente de Venecia, municipio del suroeste antioqueño, el cual se caracteriza por ser de tipo sub-bituminoso. En las Tablas 6 y 7 se presentan los resultados del análisis próximo completo y último para el carbón.

Tabla 6. Análisis próximo del carbón (%p/p)

Ensayo	Método	Resultado
Humedad residual	ASTM D 3173	4,7 %
Cenizas	ASTM D 3174	19,8 %
Materia volátil	ASTM D 3175	31,1 %
Carbono fijo	ASTM D 3172	44,4 %
Azufre	ASTM D 4239	0,7%
Poder calorífico	ASTM D 58655	5588 cal/g

Tabla 7. Análisis elemental

Elemento	%p/p
C	61,25
H	3,59
N	1,66
S	0,9
O	13

Los análisis próximo y último evidencian las diferencias en cuanto a la composición de la biomasa y el carbón, para el bagazo de caña se presenta un porcentaje de materia volátil (8,5%) mucho más alto que en el carbón (31,1%), el material volátil es importante en la formación de los gases de síntesis (Basu, 2010).

### Pruebas de fluidización

La fluidización se realizó para carbón con partículas Geldart tipo B, de 1 mm de diámetro utilizando aire como agente fluidizante (Corsino, 2009). En la Figura 3 se observa la variación en la caída de presión cuando la velocidad del aire aumenta hasta llegar a un máximo, luego disminuye ligeramente adoptando una tendencia aproximadamente constante. "La caída de presión se registró incrementando y disminuyendo el flujo de aire (abriendo-cerrando)"

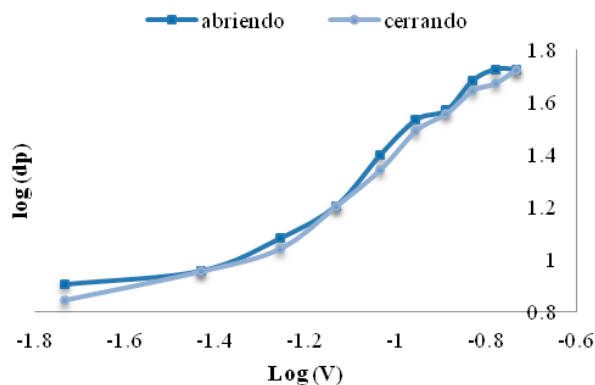


Figura 3. Curva de fluidización

De acuerdo con la tendencia de los datos de la Figura 3, se encuentra que la velocidad mínima de fluidización es de 0.19 m/s, este valor es consecuente con los consultados en la literatura y con las especificaciones del lecho (Gómez & Lopera, 2011).

### Condiciones de operación

Las condiciones de operación planteadas para las pruebas de gasificación fueron establecidas para garantizar que los parámetros entre pruebas sean com-

parables, por ello las relaciones de aire (ER) permanecen aproximadamente constantes. Los rangos de temperatura se variaron de acuerdo con el tipo de combustible, conservando los límites indicado en la literatura (Higman & Van der Burgt, 2003). En la Tabla 8 se presentan los parámetros empleados para las diferentes pruebas de gasificación.

Tabla 8. Condiciones de operación

Parámetros			
Combustible	Carbón-bagazo de caña (BC)	Bagazo de caña	Carbón
[Kg aire/ Kg biomasa]	2,82	1,811	4,13
Temperatura de operación [°C]	800-900	800-850	850-1000
Alimentación combustible [kg/h]	7,63	6,1	7,12
Flujo de aire [kg/h]	7,42	5,63	8,7

En la Tabla 9 se muestra la variación de la relación aire-combustible (ER) para cada prueba manteniendo constante la entrada de vapor (SB).

Tabla 9. Relaciones aire-combustible

Prueba	ER1	ER2	ER3	SB
Bagazo	0,3	0,4	0,5	0,5
Carbón	0,3	0,4	0,5	0,5
Cogasificación (BC)	0,3	0,4	0,5	0,5

## Resultados y discusión

A continuación se presentan los cálculos que se realizaron para determinar las características del lecho y los datos obtenidos en las pruebas de gasificación, así como los respectivos análisis de resultados. El cálculo de la porosidad para cada lecho se realizó mediante las correlaciones de Weng y Yu (ver Tabla 10).

$$14 \cong \left( \frac{1}{\varphi \varepsilon_{mf}^3} \right) \quad (1) \quad (\text{Delebarre, 2004})$$

donde  $\varepsilon_{mf}$  es la porosidad mínima de fluidización y  $\varphi$  la esfericidad de la partícula.

Tabla 10. Porosidad inicial del lecho [ $\varepsilon$ ]

Bagazo de caña	0,62
Bagazo de caña-carbón	0,48
Carbón	0,39

En la Tabla 11 se presentan las características fluido-dinámicas para el lecho de bagazo de caña, carbón y mezcla bagazo de caña-carbón (BC). En la Figura 4 se ilustra la caída de presión para cada lecho.

Tabla 11. Características de cada lecho

Parámetro	Bagazo	BC	Carbón
$\Delta P$ [Kg/ms <sup>2</sup> ]	1199,94	1799,81	1466,58
$\rho_p$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	751	840	1100
$\rho_{aire}$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	0,32	0,32	0,32
gravedad [m/s <sup>2</sup> ]	9,8	9,8	9,8
porosidad [ $\varepsilon$ ]	0,48	0,53	0,57
Altura del lecho [m]	1	1	1

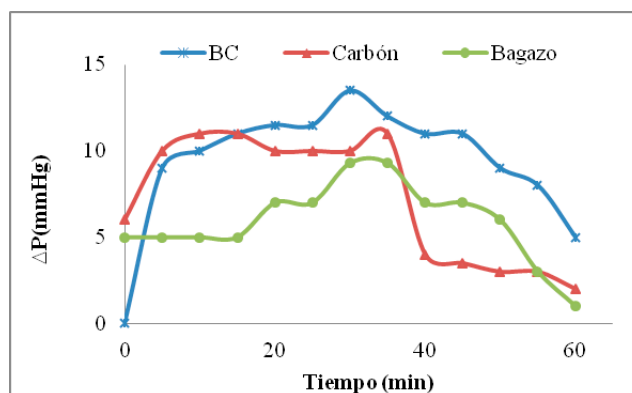


Figura 4. Caídas de presión

Para garantizar las condiciones fluidodinámicas, es necesario tener unas características apropiadas dentro de las cuales se destaca la altura del lecho. En la Figura 4 se puede apreciar la estabilidad a través del tiempo para cada prueba resaltando la caída de presión para el lecho de carbón debido a que fue de mayor tamaño en comparación con la cogasificación y la gasificación de bagazo de caña.

## Perfil de temperatura

En la Figuras 5 se presentan los perfiles de temperatura solo para cada lecho, bagazo de caña, carbón y la cogasificación de biomasa y carbón durante el tiempo de prueba. La medición se realizó durante 80 minutos para cada prueba mediante los tres primeros termopares ubicados en el primer módulo del reactor (ver Figura 2) con el fin de conocer la estabilidad en la temperatura y operar en rangos de gasificación.

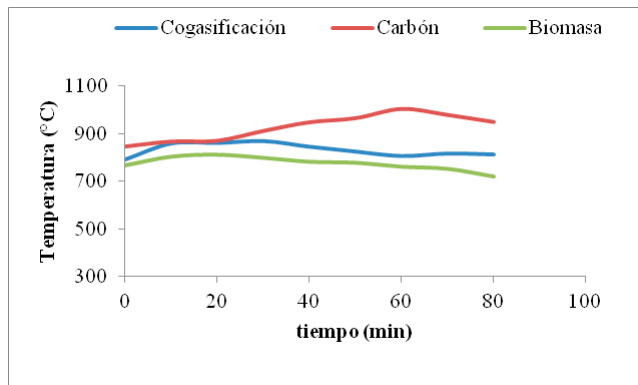


Figura 5. Perfiles de temperatura para cada lecho

Las Figuras 6 a 8 evidencian el comportamiento de la temperatura a lo largo del reactor. Se tomaron datos para cada módulo del gasificador, tomando medidas en 4 termopares, dos termopares T1 y T3 ubicados en la zona del lecho y dos más T4 y T6 ubicados en el freeboard del reactor para monitorear la temperatura de salida de los gases. (Ver Figura 2).

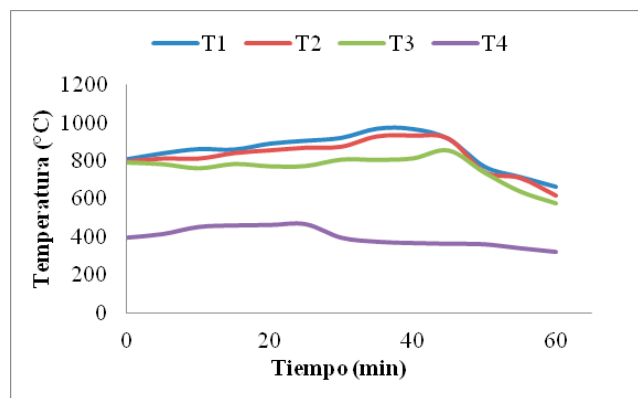


Figura 6. Perfil de temperatura para cogasificación

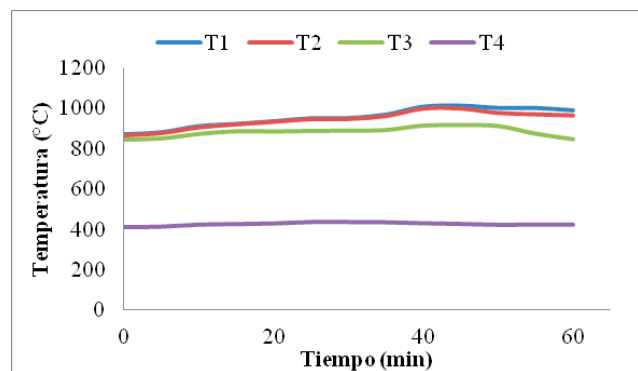


Figura 7. Perfil de temperatura para gasificación de carbón

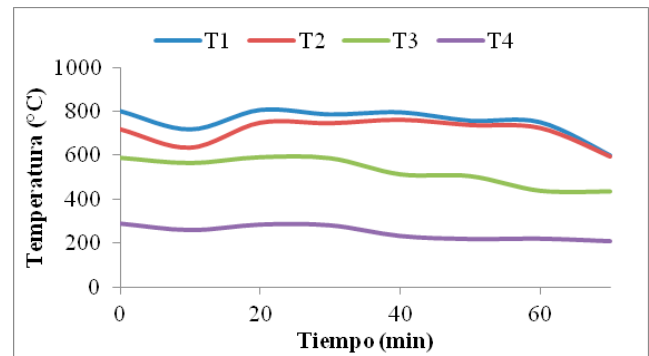


Figura 8. Perfil de temperatura para gasificación de biomasa

El perfil de temperaturas evidencia la diferencia energética que existe entre el carbón y la biomasa, puesto que el carbón posee mayor poder calorífico como se muestra en las Tablas 4 y 6; sin embargo, las temperaturas alcanzadas para las tres pruebas son ideales para la gasificación (Higman & Van der Burgt, 2003). Se destaca la cogasificación de bagazo de caña y carbón que presenta una buena estabilidad, conservando un rango de temperaturas de entre 850 °C y 900 °C.

### Composición de los gases

La línea de gases consta de un tren de limpieza previo al cromatógrafo y posterior a los ciclones del reactor, está conformado por burbujeadores con solvente para retirar impurezas, también posee dos impinger con sílica gel para retirar la humedad. El cromatógrafo utilizado es un Varian 3800 equipado con columnas Hayesep y Molsieve que permiten la identificación de los compuestos. En la Tabla 12 se presentan las condiciones de operación.

Tabla 12. Método de cromatografía

Ítem	Parámetro
Temperatura horno	40 °C
Temperatura Inyector	100 °C
Temperatura detector	170 °C
Temperatura filamento	250 °C
Presión Columnas	10 psi
Flujo	16,9 ml/min

En la Figura 9 se ilustran la composición de los gases generados bajo condiciones de estado estable durante cada prueba de gasificación. Cada prueba se realizó por duplicado y se tomaron datos cada 20 minutos.

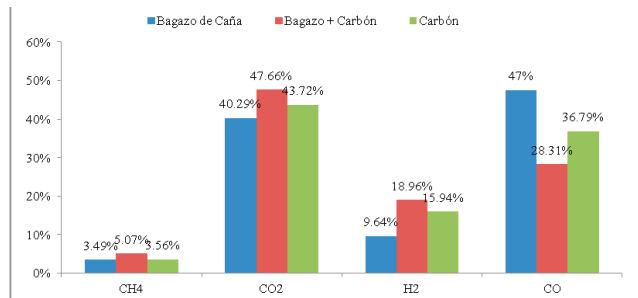


Figura 9. Composición del syngas

Las relaciones aire-combustible para la gasificación de bagazo de caña, bagazo de caña-carbón y carbón se realizaron manteniendo aproximadamente constante la relación vapor combustible, en las Figuras 10 a 12 se presenta gráficamente el comportamiento y la producción de hidrógeno para cada combustible.

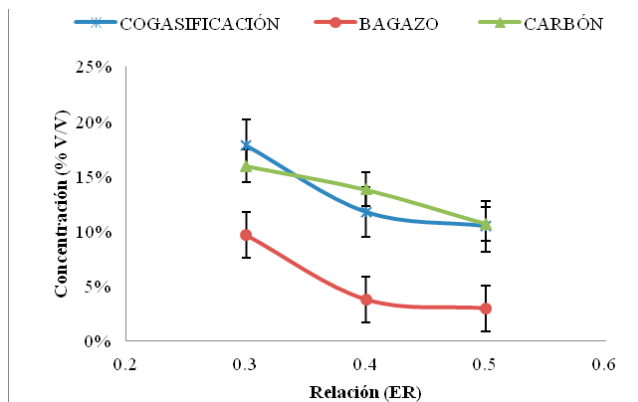


Figura 10. Producción de hidrógeno-relación de aire (ER)

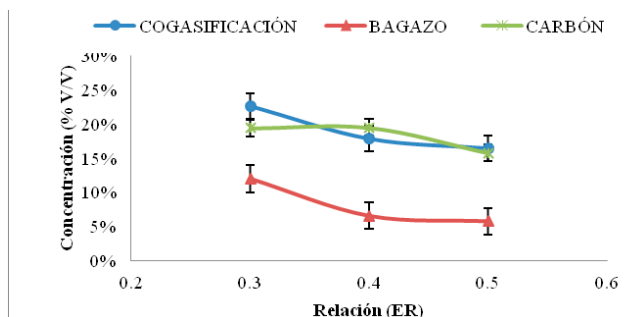


Figura 11. Producción de CO-relación de aire (ER)

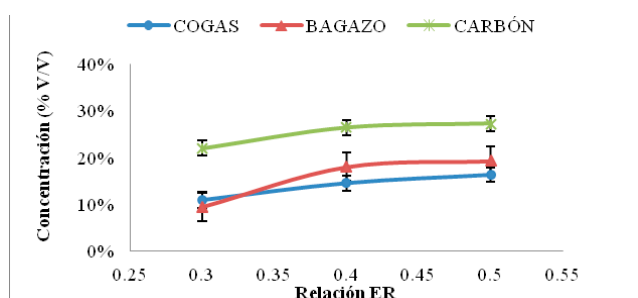


Figura 12. Producción de CO<sub>2</sub>-relación de aire (ER)

La temperatura y la relación aire combustible presentan una marcada influencia sobre el desempeño de la gasificación, arrojando mejores resultados a temperaturas de entre 850 °C y 950 °C y relaciones aire (ER) de 0,3 debido a la baja cantidad de oxígeno presente en el proceso lo que favorece las reacciones de gasificación y producción de hidrógeno.

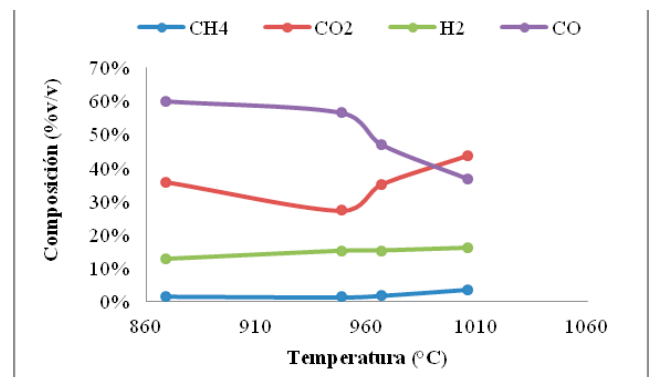


Figura 13. Relación temperatura-composición para gasificación de carbón.

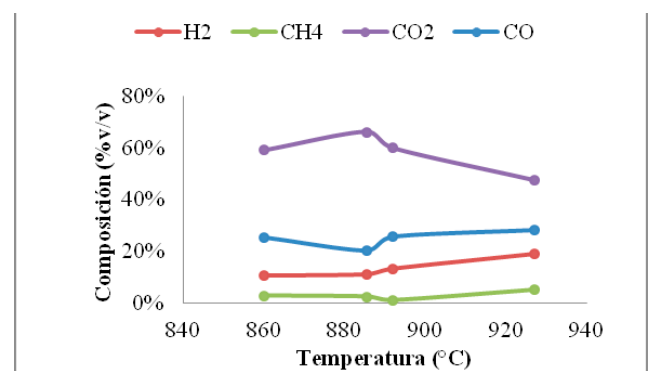


Figura 14. Relación temperatura-composición para cogasificación.

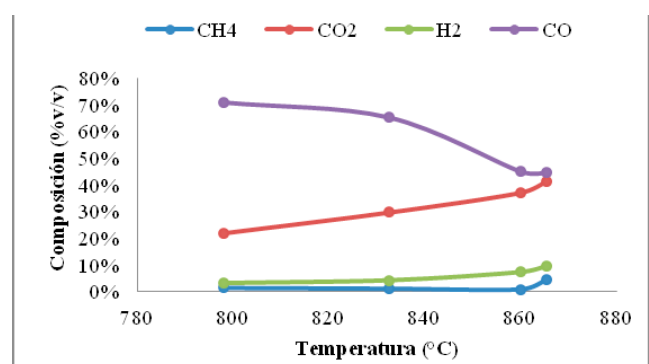


Figura 15. Relación temperatura-composición para gasificación de bagazo de caña

La variación de la composición para las pruebas de gasificación realizadas presenta un aumento en la participación de hidrógeno (H<sub>2</sub>) y una disminución en la generación de monóxido de carbono (CO) conforme aumenta la temperatura. La cogasificación presenta me-

jores resultados evidenciando aumentos en hidrógeno y monóxido, debido posiblemente al efecto sinérgico que se da al gasificar estos dos tipos de materia prima y a que el potencial de materia volátil es mucho mayor en la biomasa. Estos procesos de volatilización se complementan con los del carbón llevándose a cabo reacciones heterogéneas en el material poroso aumentando la producción de hidrógeno. (Basu, 2010).

## Análisis último

Se realizó análisis último para cada muestra tanto en el lecho del reactor como en el ciclón, esto con el fin de realizar los balances energéticos para cada prueba de gasificación. En la Tabla 17 y 18 se presentan los resultados del análisis.

**Tabla 13.** Resultado análisis último de las partículas colectadas del fondo del reactor

Reactor	%C	%H	%N	%Carbono Fijo	%H <sub>2</sub> O	%Cenizas	%Volátiles
Bagazo	0,39	0,51	0,13	0,27	0,66	95,36	3,71
Bagazo-carbón	0,34	0,67	0,15	0,21	0,77	94,48	4,54
Carbón	0,96	0,12	0,12	0,7	0,12	94,65	4,53

**Tabla 14.** Resultado análisis último de las partículas colectadas en el ciclón

Ciclón	%C	%H	%N	%Carbono Fijo	%H <sub>2</sub> O	%Cenizas	%Volátiles
Biomasa	39,44	3,42	1,16	37,30	2,68	37,89	22,13
Biomasa-carbón	25,61	0,90	0,62	23,31	0,66	62,25	11,48
Carbón	42,42	2,14	1,48	39,10	1,50	42,22	13,86
Cenizas	0,36	0,76	0,28	0,30	0,51	95,62	3,57

El contenido de material mineral presente en el bagazo de caña y el carbón junto con la humedad afectan el valor del poder calorífico. El análisis próximo base DAF (libre de cenizas y humedad), arroja como resultado que el contenido de carbono fijo presente en el bagazo de caña es de 60,75%, 62,84% para la cogasificación y 69,47% para el carbón, estos resultados confirman que la mayor conversión durante el proceso de gasificación se da para el carbón seguido de la cogasificación de carbón y biomasa debido a que el contenido de carbono fijo da una idea de la cantidad de char que se puede formar así como del contenido de inquemados en las cenizas. En la Tabla 13 se aprecia el grado de conversión de cada materia prima.

## Balances

En la tabla 15 se presentan los balances de energía para las pruebas de gasificación de bagazo de caña, la cogasificación de bagazo de caña y carbón y gasificación de carbón.

**Tabla 15.** Poder calorífico y eficiencia energética de la gasificación

Prueba	ER	SB	Relación syngas/biomasa	Poder calorífico syngas [MJ/Nm <sup>3</sup> ]	Eficiencia
Bagazo	0.3	0.5	1.93	1.63	15.1%
Carbón	0.3	0.5	2.04	1.76	18.2%
C-B	0.3	0.5	1.87	2.28	24.3 %

Los resultados más importantes obtenidos de los balances de materia y energía están asociados a la gasificación de carbón y cogasificación de biomasa donde se logran unas eficiencias energéticas del 18% y 24% respectivamente. El poder calorífico del syngas es bajo debido a los subproductos generados en el proceso y a etapas de combustión parcial que se vieron favorecidas por la cantidad de oxígeno presente en las pruebas evidenciado por el agua producida (Franco et al., 2002). La eficiencia se calculó mediante la relación energética producto de la energía obtenida en el gas de síntesis y la energía suministrada al reactor (energía aportada por el combustible).



## Conclusiones

Los datos obtenidos de la experimentación permiten identificar que la gasificación de la biomasa y el carbón se favorece con el aumento de la temperatura y la relación de vapor. Sin embargo con un aumento en la relación de aire ER, se ven favorecidas las reacciones de combustión, dándose una combustión parcial con cantidades significativas de H<sub>2</sub> y CO.

En las pruebas de cogasificación se obtiene un gas con mayor poder calorífico, en comparación con las de gasificación tanto para biomasa como carbón, puesto que hay una mayor generación de hidrógeno y monóxido de carbono producto de la descomposición de volátiles de la biomasa y reacciones heterogéneas con el carbón. Se observó una buena relación en la cogasificación de biomasa y carbón donde la producción de hidrógeno fue aproximadamente del 19%, confirmando la importancia de esta tecnología en la producción de energía y en la carrera por sustituir los combustibles tradicionales.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias) y al Banco Interamericano de Desarrollo (BID) por el soporte financiero.

## Referencias

- Alauddin, Z., Lahijani, P., Mohammadi, P., & Mohamed, P. (2010). Gasification of lignocellulosic biomass in fluidized beds for renewable energy development: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (9), 2852–2862. Gasification Technologies Council. (n.d.). *Gasification Technologies*. Retrieved 06 20, 2014, from <http://www.gasification.org/>
- André, R., Pinto, F., & Franco, C. (2005). Fluidised bed co-gasification of coal and olive oil industry wastes. *Fuel*, 84 (12), 1635-1644.
- Basu, P. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis. Practical Design and Theory*. Elsevier.
- Bell, D., & Towler, B. (2011). Gasifiers. In *Coal Gasification and Its Applications*. (pp. 73-100). Elsevier.
- Campoy, M., Gómez-Barea, A., & Ollero, P. (2014). Gasification of wastes in a pilot fluidized bed gasifier. *Fuel Processing Technology*, 63-69.
- Corsino, P. (2009). *Simulación numérica de un lecho fluido bidimensional para la determinación de la velocidad de mínima*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- Delebarre, A. (2004). Revisiting the Wen and Yu Equations for Minimum Fluidization Velocity Prediction. *Chemical Engineering Research and Design*, 587-590.
- Escalante, H., Orduz, J., & Zapata, H. (2011). *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*. Bogota D. C: Ministerio de Minas y Energía.
- Franco, C., Pinto, F., Gulyurtlu, I., & Cabrita, I. (2002). The study of reactions influencing the biomass steam gasification process. *Fuel*, 835-842.
- Gil, J., Corella, J., Aznar, M. P., & Caballero, M. A. (1999). Biomass gasification in atmospheric and bubbling fluidized bed: Effect of the type of gasifying agent on the product distribution. *Biomass and Bioenergy*, 17, 389-403.
- Gómez-Barea, A., & Leckner, B. (2010). Modeling of biomass gasification in fluidized bed. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36 (4), 444-509.
- Gómez, C., & Lopera, E. (2011). Evaluación experimental de las velocidades minimas de fluidización para mezclas de carbón ripio y residuos agrícolas colombianos. *Dyna*.
- Higman, C., & Van der Burgt, M. (2003). *Gasification*. Elsevier Science.
- IDAE, BESEL S.A. (2007). *Energías Renovables: biomasa gasificación*.
- Naranjo, M. C. (2009). *Biomass and waste gasification in fluidized bed: pilot plant studies*. Tesis, Universidad de Sevilla, Sevilla.
- Pinto, F., André, R., Franco, C., & López, H. (2009). Co-gasification of coal and wastes in a pilot-scale installation 1: Effect of catalysts in syngas treatment to achieve tar abatement. *Fuel*, 88 (12), 2392-2402.
- Rühl, C. (2013). BP Statistical Review of World Energy. 14.
- UPME. (2005). *La Cadena del Carbón en Colombia*. Bogotá D. C: Ministerio de Minas y Energía.
- Vélez, F. C. (2009). Co-gasification of Colombian coal and biomass in fluidized bed: An experimental study. *Fuel*, 424-430.