

Gasificación adiabática del bagazo de caña de azúcar usando aire-vapor

Adiabatic Gasification of Sugarcane Bagasse Using Air-Steam

53
técnica

Carlos Andrés Forero Rodríguez^a, Gerardo Gordillo Ariza^b

PALABRAS CLAVES

Conversión de energía, equilibrio químico, gasificación, poder calorífico.

KEY WORDS

Chemical equilibrium, energy conversion, gasification, heating value.

RESUMEN

Este artículo presenta un estudio para estimar el potencial del bagazo de caña de azúcar como combustible alternativo en la producción de gases combustibles, que pueden ser usados para la generación de potencia eléctrica en sitio. Se usó equilibrio químico para estimar las especies producidas por gasificación adiabática del bagazo con diferentes mezclas de aire-vapor. Con el programa CEA (Chemical equilibrium with applications) se estimó la composición de aproximadamente 150 especies; las especies producidas en pequeñas cantidades (trazas) no son presentadas. Los parámetros investigados fueron la relación de equivalencia definida como Aire estequiométrico/Aire suministrado al reactor (1–4.5) y la relación de vapor-combustible (0.1–0.7 kmol de vapor/kmol de combustible). Para el rango de parámetros investigado, la composición varió en los siguientes rangos: CO (8%–29.3%), N₂(26.5%–57.9%), H₂(3.6%–29.3%), CH₄(0–0.012), H₂O(0.038–0.235). Con la composición de los gases también fue calculado el poder calorífico de los gases y el porcentaje de conversión de energía.

ABSTRACT

This paper presents a study, which estimates sugarcane bagasse potential as feedstock for the production of fuel gases that can be used for power generation. Chemical equilibrium was used to estimate the species (gases) produced by gasification, under adiabatic conditions, using different amounts of air-steam mixtures for partial oxidation. The software CEA (Chemical Equilibrium with Applications) was used to estimate the composition of about 150 species; only significant species are reported here. The parameters investigated were equivalence ratio defined as the stoichiometric air/air supplied to the reactor (1-4.5) and the steam to fuel ratio (0.1-0.7 kmol of steam/kmol of fuel). For the studied conditions, the composition of the gases were: CO(8%–29.3%), N₂(26.5%–57.9%), H₂(3.6%–29.3%), CH₄(0–0.012), H₂O(0.038–0.235). Heating value and energy conversion efficiency were calculated together with the composition of the gases.

a PhD. en Ingeniería Mecánica. Profesor asistente, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia. ✉ ca.forero48@uniandes.edu.co

b Estudiante, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia. ✉ g.gordillo43@uniandes.edu.co

INTRODUCCIÓN

Debido al continuo aumento en el consumo de energía y la contaminación causada en procesos de combustión de combustibles fósiles, es necesario generar nuevas tecnologías para el uso de combustibles alternativos, los cuales permitan reducir la dependencia de los combustibles fósiles como el petróleo, el gas natural y el carbón. Por lo general, los procesos de combustión de combustibles fósiles producen gases con efecto invernadero tales como CO_2 , NH_3 , entre otros, que incrementan la temperatura ambiente. La demanda de energía, principalmente en los países desarrollados, ha llegado a límites nunca antes esperados; esto ha ocasionado, entre otras cosas, el calentamiento global que cada día se hace más evidente debido a sus grandes implicaciones a nivel mundial.

El uso de energías alternativas podría solucionar parte del problema ambiental y energético. Una posible solución es el uso de biomasa en procesos biológicos y térmicos de conversión de energía [1]. La gasificación de biomasa, un proceso térmico para producir gas de síntesis [2, 3, 4] (mezcla de gases combustibles), podría ser una solución alternativa, ya que la biomasa es un combustible neutral en la producción de CO_2 . Adicionalmente, la biomasa también puede ser usada como combustible en procesos de combustión para generación de potencia; sin embargo, estos procesos ocurren por lo general a temperaturas altas que favorecen la formación de NO_x y SO_x . El uso de biomasa (cultivos energéticos, residuos agrícolas y municipales, etc.) como combustible en procesos de gasificación para generación de potencia no sólo alivia la gran demanda de energía, sino que también evita la contaminación causada por los combustibles fósiles y el manejo inadecuado de los residuos.

Gracias a su clima tropical, Colombia es un gran productor de caña de azúcar (aproximadamente 30 millones de toneladas al año) [5], lo que genera una gran cantidad de subproductos que, como se ha discutido antes, pueden ser usados para la producción de energía. Un importante subproducto es la fibra (bagazo),

que tiene un considerable poder calorífico (19469kJ/kg en base seca) [6].

La gasificación de biomasa usa aire puro [7, 8], vapor de agua [9, 10], aire-vapor [11, 12] y oxígeno puro o combinado con vapor de agua, para la oxidación parcial del combustible. Las especies (gases) producidas por gasificación de biomasa dependen de ciertos parámetros de operación como el tipo de biomasa, el tipo de reactor, el tiempo de residencia, el agente oxidante, etc. Como es usual, la gasificación con oxígeno puro o aire puro produce mezclas ricas en CO , mientras que la gasificación con vapor o una mezcla de vapor-aire produce gases ricos en hidrógeno. La gasificación de biomasa con puro vapor de agua (reformado de vapor) produce solo H_2 y CO_2 , no obstante, es un proceso endotérmico que requiere de energía externa. Por otra parte, la gasificación con aire-vapor puede hacerse adiabáticamente (sin energía externa) para producir mezclas ricas en H_2 y CO_2 y un bajo contenido de CO . Dependiendo de la relación aire-vapor suministrada al reactor, el proceso global de gasificación puede ser adiabático, exotérmico o endotérmico. El presente artículo trata sobre la estimación de las especies producidas por la gasificación adiabática de bagazo usando como oxidantes diferentes mezclas de aire-vapor. Además, el valor calorífico y la eficiencia de conversión de energía fueron estimados con la composición estimada. Dos parámetros fueron investigados: la relación de equivalencia (ER), que es la relación molar entre el aire estequiométrico y el aire actual suministrado para oxidación parcial, y la relación de combustible-vapor (SF), que es la relación entre las moles de combustible y las moles de vapor de agua.

REVISIÓN DE LA LITERATURA

La gasificación es un proceso termoquímico en el cual un combustible es transformado en un gas combustible de bajo poder calorífico, mediante una serie de reacciones que ocurren a determinada temperatura en presencia de agentes oxidantes [13]. El gas produ-

cido puede ser utilizado en procesos de combustión para producir calor, en una turbina de gas o un motor de combustión interna para generar potencia.

De Filipis et al [14] presentan un estudio preliminar sobre un reactor para realizar la gasificación de bagazo. En éste estudio se usa equilibrio químico para realizar cálculos termodinámicos y determinar las condiciones (gasificación completa evitando la formación de carbono y alquitrán) bajo las cuales debería poder trabajar el reactor. El resultado obtenido indica que es posible realizar la configuración del reactor para conseguir la gasificación completa sin producir carbono ni alquitrán.

Pellegrini et al [15] hacen un análisis sobre la exergía de la gasificación de caña de azúcar. En éste artículo se presenta un modelo minimizado del proceso de gasificación utilizando equilibrio químico para determinar las tendencias de los parámetros de trabajo del sistema (concentraciones de gases combustibles) y se analiza la influencia de diferentes variables (temperatura de gasificación, humedad, temperatura del aire). Los resultados obtenidos se comparan con resultados de la literatura de sistemas reales y se obtiene una buena aproximación del modelo a los resultados de la literatura.

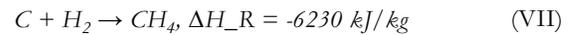
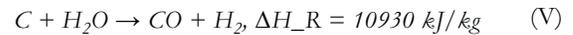
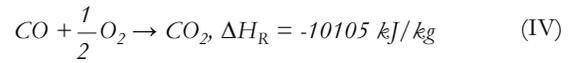
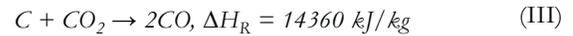
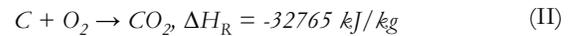
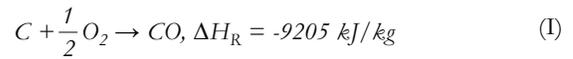
Gordillo et al [16] usan el software CEA para estimar la producción de gases por la gasificación de TXL (Texas Lignite Coal), WYC (Wayoming Coal), FB (Feedlot Biomass) usando aire-vapor para oxidación parcial. En este estudio se presenta el efecto de la ERM, definida como la relación entre el oxígeno teórico para completa combustión y el oxígeno suministrado al reactor, y la fracción de vapor a combustible (S:F) sobre la producción de especies. Para el rango de los parámetros investigados los resultados obtenidos son: CO[0,154-0,23], CH₄[0,013-0,02], H₂[0,107-0,072], C₂H₆[0,004-0,015], CO₂[0,154-0,101], N₂[0,571-0,563].

Como puede verse en la revisión de la literatura, existen algunos trabajos previos en la gasificación de bagazo usando aire como agente oxidante. Sin embargo,

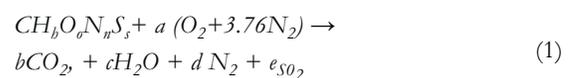
en este artículo se presentan resultados de la gasificación de bagazo usando mezclas de aire y vapor para oxidación parcial con el propósito de obtener mezclas de gases ricas en hidrógeno.

MARCO TEÓRICO

En la gasificación de biomasa suceden muchas reacciones; sin embargo, el proceso global se puede modelar con las siguientes reacciones [18].

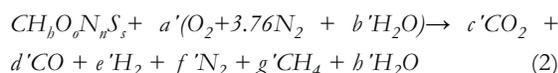


Donde entalpías de reacción negativas indican reacciones exotérmicas y entalpías de reacción positivas, reacciones endotérmicas. En la gasificación adiabática, el calor liberado por las reacciones exotérmicas equilibra el calor requerido por las reacciones endotérmicas. En el proceso de gasificación de biomasa se produce una mezcla de gases combustibles cuyas fracciones molares se pueden estimar usando (i) conservación de masa y energía para un número reducido de especies, y (ii) equilibrio químico para un mayor número de especies. La combustión completa de cualquier combustible con aire significa que todos los componentes del combustible (C, H, O, N, S) se oxidan completamente para producir ciertos gases con valor calorífico igual a cero (Ecuación 1).



Por otra parte, la gasificación de cualquier biomasa es un proceso en el que los componentes combustibles

contenidos en la biomasa son oxidados parcialmente para producir gases combustibles tales como CH₄, CO, H₂, etc. La Ecuación 2 presenta la gasificación de biomasa con aire y vapor de agua para producir CO₂, CO, H₂, CH₄. Otros hidrocarburos son considerados en trazas.



La relación de equivalencia (ER) indica la relación entre la relación actual y la relación teórica de combustible-aire; esta relación define si la reacción es rica o pobre. La Ecuación 3 define la relación de equivalencia utilizada en éste artículo.

$$ER = \frac{Aire_{Teórico}}{Aire_{Actual}} = \frac{a}{a'} [\text{kmol/kmol}] \quad (3)$$

La adición de vapor de agua permite obtener gases combustibles ricos en H₂. La relación de vapor a combustible suministrada al reactor (SF) está definida en la Ecuación 4.

$$SF = \frac{N_{Vapor}}{N_{Fuel}} = \frac{b'}{1} \quad (4)$$

Donde N_{Vapor} y N_{Fuel} son las moles de vapor y combustible suministradas al reactor. Para un proceso de gasificación adiabática, la conservación de energía puede ser representada con la Ecuación 5.

$$\sum_k N_{k,p} h_{k,p}(T_p) = \sum_k N_{k,r} h_{k,r}(T_r) \quad (5)$$

Donde $N_{k,p}$ y $h_{k,p}$ son las moles y entalpías totales de los productos a una cierta temperatura T_p y $N_{k,r}$ y $h_{k,r}$ las moles y entalpías de los reactantes a una temperatura T_r .

La ecuación empírica y la entalpía de formación de la biomasa se pueden determinar usando conservación de masa y los análisis próximo y último [6]. Los análisis próximo y último, junto con la fórmula empírica del bagazo objeto de este estudio, son presentados en la Tabla 1.

Como fue discutido anteriormente, el software CEA (*Chemical equilibrium and applications*) provisto por la

Material Volátil (%)	87.8
Carbono Fijo (%)	12.2
C (%)	49.9
H (%)	6
O (%)	43.9
N (%)	0.17
Ecuación Empírica	CH _{1,44} O _{0,66} N _{0,0027}
Entalpía Formación (kJ/Kmol)	-99665
HHV (kJ/kg)	19469
LHV (kJ/kg)	18156

Tabla 1. Análisis próximo y último en base seca y libre de ceniza (DAF) [6]

NASA fue usado para estimar la composición adiabática de las especies producidas (alrededor de 150 especies). Este software hace uso de librerías de equilibrio químico para calcular las fracciones molares de las especies generadas con el proceso. En presente artículo son presentadas las especies más relevantes, otras que aparecieron en pequeñas concentraciones (trazas) no son presentadas. Las condiciones de operación utilizadas en el modelo se presentan en la Tabla 2.

El poder calorífico de los gases (HHV_{gases}) y la eficiencia de conversión de energía (ECE) se calcularon con la composición de los gases y las Ecuaciones 6 y 7 respectivamente.

$$HHV_{gases} = \sum_k X_i HHV_i \quad (6)$$

Donde X_i y HHV_i son la fracción molar y el poder calorífico de cada una de las especies en base seca y HHV_{gases} es la densidad de energía (kJ/m³) de los gases combustibles.

$$ECE = \frac{HHV_{gases}}{N_{Fuel} * HHV_{Fuel} + N_{vapor} * 18(\lambda + 4.18(373 - 298))} \quad (7)$$

Parámetros	
Combustible	Bagazo de caña
Presión (kPa)	100
Temperatura Aire (K)	298
Temperatura Vapor (K)	373
ER	1.00 - 4.50
SF	0.1 - 0.7

Tabla 2. Condiciones de operación para el modelo

Donde N_{Fuel} y N_{vapor} son las moles de combustible y vapor suministradas por cada m³ de gases combustibles en base seca y λ es la entalpía de vaporización del agua.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección son discutidos los resultados obtenidos para la gasificación con aire y con aire-vapor.

GASIFICACIÓN CON AIRE

Las fracciones molares de las especies producidas por la gasificación con aire son presentadas en la Figura 1 como función de la ER.

Los resultados muestran que incrementando la ER se tiende a producir gases ricos en CO y H₂, pero pobres en CO₂ y H₂O. La producción de CH₄ no se ve afectada de manera significativa por ER.

GASIFICACIÓN CON AIRE - VAPOR

El efecto de la ER y SF sobre la temperatura adiabática de equilibrio y la composición de gases es discutido en esta sección. La Figura 2 presenta el efecto de ER y SF sobre la temperatura de equilibrio adiabática. El aumento en la ER significa menos aire entrando al reactor; por lo tanto, hay menos oxígeno disponible para las reacciones I y II que son exotérmicas y producen CO, CO₂ y calor. Menos calor liberado en el proceso implica una disminución en la temperatura adiabática. Adicionalmente, se puede observar que la temperatura es más sensible a cambios en la ER que a cambios en la SF.

El efecto de la ER en la producción de gases se presenta en la Figura 3 para la gasificación adiabática a SF=0.4. Los resultados muestran que al incrementar la ER se aumenta la producción de CO₂ y H₂, pero

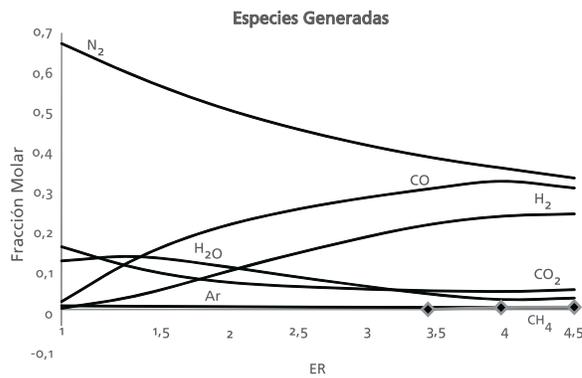


Figura 1. Efecto de ER en la producción de gases combustibles

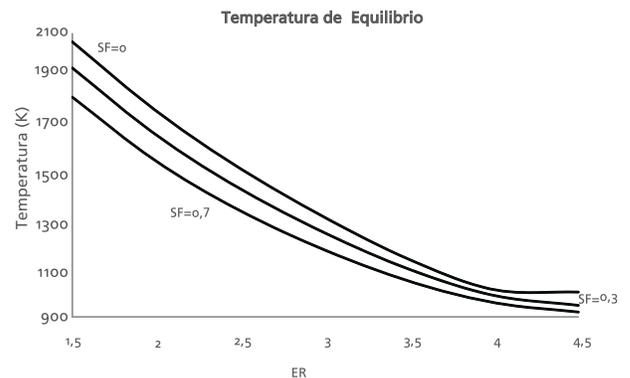


Figura 2. Efecto de ER y SF en la temperatura adiabática

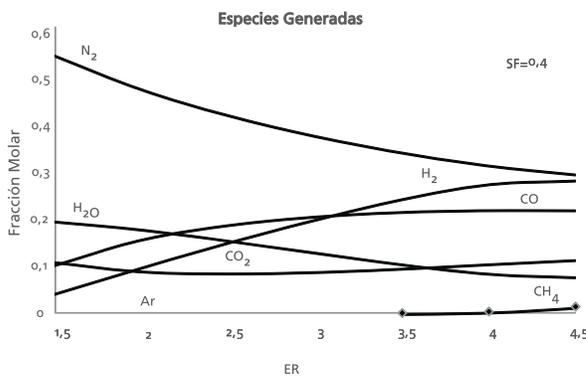


Figura 3. Efecto de ER en la producción de gases combustibles con SF=0,4

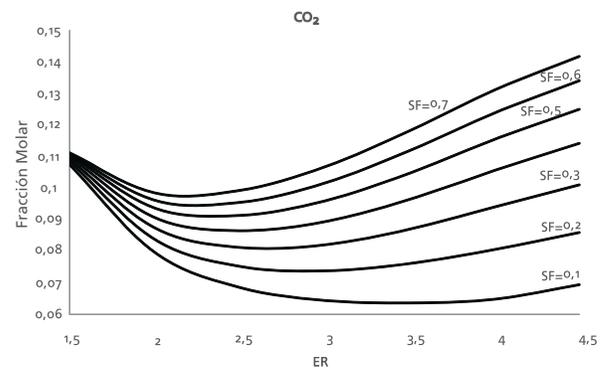


Figura 4. Efecto de ER y SF en la producción de CO₂

disminuye la producción de N_2 y H_2O . A $ER < 3.5$ incrementos en la ER tienden a mejorar la producción de CO , no obstante, a $ER > 3.5$ la ER parece no afectar la concentración de CO . Como fue discutido antes, al incrementar la ER la temperatura de equilibrio decrece (Figura 2), esto favorece la reacción de carbono con oxígeno para producir CO_2 en vez de CO [17]. Más átomos de carbono dejando el reactor como CO_2 implican menos átomos disponibles para la reacción (I).

Las Figuras 4 y 5 presentan el efecto de las ER y SF en la producción de CO_2 y CO respectivamente. Las curvas de CO_2 muestran un punto de inflexión a $2 < ER < 3$ (dependiendo de SF). Antes del punto de inflexión, la producción de CO_2 decrece con incrementos en la ER, mientras que después del punto de inflexión la producción de CO_2 se incrementa con aumentos en la ER. La disminución en la producción de CO_2 implica más átomos de C disponibles para la producción de CO vía la reacción $C+1/2O_2 \rightarrow CO$ (Figuras 4 y 5). Los puntos de inflexión de la grafica 4 indican que a esas ER el efecto de la temperatura en la producción de CO_2 empieza a ser más importante que para producir CO . La reacción ($C+O_2 \rightarrow CO_2$), es favorecida a bajas temperaturas mientras que la reacción ($C+1/2 O_2 \rightarrow CO$) es importante a altas temperaturas [17].

Como fue descrito antes, el incremento de la ER implica menos átomos de oxígeno, lo cual ocasiona una disminución en la temperatura y, por lo tanto, ayuda a la formación de CO_2 vía la reacción II.

En la Figura 6 se presenta el efecto de la ER y SF en la producción de H_2 . Al aumentar la ER, manteniendo SF constante, se presenta una mayor relación de vapor/aire; por lo tanto, hay más átomos de H disponibles para las reacciones de vapor con C [$C+H_2O \rightarrow CO+H_2$] y con CO [$CO+H_2O \rightarrow H_2+CO_2$]. Como resultado de esto, la producción de H_2 se aumenta mientras que la producción de CO tiende a disminuir especialmente a altas ER. Al incrementar la SF manteniendo la ER constante, la producción de CO_2 y H_2 aumenta pero la producción de CO disminuye.

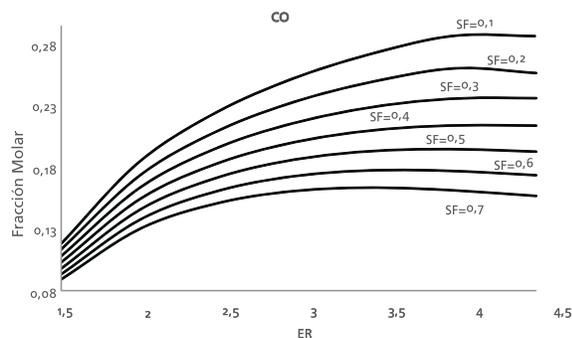


Figura 5. Efecto de ER y SF en la producción de CO

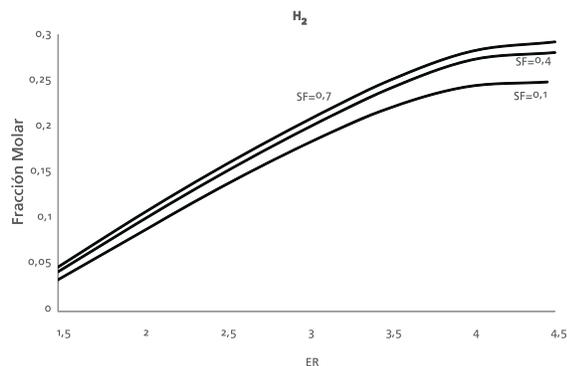


Figura 6. Efecto de ER y SF en la producción de H_2

Esto es debido a que al incrementar la SF el proceso de gasificación ocurre en un ambiente rico en H_2O que favorece las reacciones V y VI que producen mezclas ricas en H_2 y CO_2 . Se puede observar que la producción de H_2 es más sensible a cambios en la ER que a cambios en la SF. En las Figuras 5 y 6 también puede verse que la SF afecta más la producción de CO que la producción de H_2 . En otras palabras, al aumentar la SF el valor neto en la disminución del CO es mayor que el valor neto en el aumento de H_2 .

PODER CALORÍFICO

El poder calorífico de los gases es presentado en la Tabla 3, como función de la ER y la SF. A medida que aumenta la ER, aumenta el HHV de los gases; esto es debido a que aumenta la producción de H_2 . Adicionalmente con valores altos de la ER empiezan a aparecer pequeñas fracciones molares de CH_4 que tienen un valor calorífico superior ($\sim 38000 \text{ kJ/m}^3$) al CO ($\sim 10300 \text{ kJ/m}^3$) y H_2 ($\sim 10500 \text{ kJ/m}^3$). Por otro lado

HHV (KJ/m³)

ER ↓	SF→	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70
1,50		2131,18	2123,52	2116,17	2108,96	2102,15	2095,53	2089,19
2,00		3661,69	3636,11	3611,91	3589,01	3567,23	3546,77	3526,92
2,50		4756,37	4710,52	4667,48	4627,03	4589,07	4553,10	4519,06
3,00		5564,71	5495,87	5432,35	5372,89	5317,78	5265,73	5217,03
3,50		6179,32	6083,59	5996,84	5917,36	5844,34	5776,63	5714,32
4,00		6698,50	6570,26	6457,01	6356,43	6265,81	6184,05	6109,99
4,50		6878,60	6873,32	6878,72	6801,61	6692,45	6595,87	6509,64

Tabla 3. Poder calorífico de los gases combustibles generados (KJ/m³)

ER ↓	SF→	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70
1,50		35,172	34,207	33,283	32,393	31,545	30,728	29,946
2,00		53,886	52,383	50,940	49,555	48,227	46,952	45,730
2,50		66,563	64,684	62,882	61,151	59,491	57,901	56,372
3,00		76,077	73,959	71,914	69,951	68,060	66,242	64,493
3,50		83,568	81,339	79,165	77,052	75,008	73,026	71,105
4,00		88,811	86,640	84,448	82,262	80,105	77,981	75,902
4,50		83,800	84,871	85,818	84,635	82,433	80,244	78,075

Tabla 4. Eficiencia de conversión de energía (%)

se puede observar que al incrementar la SF el HHV de los gases tiende a disminuir un poco. Lo anterior se debe a que al aumentar la SF el valor del aumento de H₂ es menor que el valor de la disminución de CO. Aunque el HHV disminuye un poco con incrementos en la SF, los gases producidos con altas SF son ricos en H₂ lo que los hace muy atractivos desde el punto de vista ambiental, ya que la combustión de H₂ produce calor y H₂O.

En la Tabla 4 se puede observar un aumento en la eficiencia a medida que aumenta el valor de la ER, esto se debe principalmente a que el HHV de los gases también aumenta con incrementos en la ER; del mismo modo, se puede observar una leve disminución de la eficiencia a medida que aumenta el valor de SF. Es importante resaltar la diferencia que se presenta en la tendencia para ER=4,5 y 0,1<SF<0,4; esto se debe a que bajo estas condiciones de operación empieza a producirse carbono puro debido a una deficiencia de oxígeno para completar reacción del carbono fijo contenido en la biomasa.

Altos valores de la ER (ER>4) implican bajo oxígeno suministrado al reactor, por lo tanto, bajo estas condiciones no hay el oxígeno suficiente para la combustión del carbono fijo (FC) y empieza a aparecer carbono puro como subproducto. En otras palabras, a ER>4 el proceso tiende a ser pirolisis que produce carbono, gases y ceniza.

En general las mezclas ricas en H₂ y CH₄ presentan una mejor eficiencia de conversión debido a sus altos poderes caloríficos, comparados con la del CO.

CONCLUSIONES

1. Para obtener mezclas de gases ricas en hidrógeno es necesario realizar el proceso en un ambiente rico en vapor de agua.
2. Las mejores condiciones para obtener mezclas ricas en hidrógeno son con valores altos de la ER.
3. En general la producción de los diferentes gases combustibles es más sensible a variaciones en la ER que a variaciones en la SF.

4. La gasificación del bagazo con aire-vapor produce mezclas ricas en H_2 mientras que la gasificación con únicamente aire produce mezclas ricas en CO.
5. La fracción máxima de H_2 (0,293) se obtuvo a $ER=4,5$ y $SF=0,7$; mientras que la máxima fracción de CO (0,28) se obtuvo a $ER=4$ y $SF=0,1$.
6. En general para los parámetros estudiados $1,5 < ER < 4,5$ y $0 < SF < 0,7$ la producción de gases fue: CO(8%–29,3%), N_2 (26,5%–57,9%), H_2 (3,6%–29,3%), CO_2 (6,8%–14%).
7. La gasificación a $ER > 4$ implica la producción de carbono puro como subproducto; es decir que a $ER > 4$ el proceso tiende a ser pura pirólisis para producir carbono activado (C) y gases livianos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D.L. Klass. *Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals*. San Diego: Academic Press, 1998.
- [2] K. Annamalai, J.M. Sweeten, M. Freeman, M. Mathur, W. O'Dowd, G. Walbert et al. "Co-firing of coal and cattle biomass (FB) fuels. Part III: fouling result from a 500,000 Btu/h pilot plant scale burner". *Fuel*. Vol. 82, 2003pp. 1195–1200.
- [3] M. Sami, K. Annamalai, M. Wooldridge. "Co-firing of coal and biomass fuel blends". *J Prog Energy Combust Sci*, Vol. 27, No. 2, 2001, pp. 171–214.
- [4] N. Carlin, K. Annamalai, J.M. Sweeten, S. Mukhtar. "Thermo-chemical conversion analysis on dairy manure-based biomass through direct combustion". *Int J Green Energy*, Vol. 4, No. 2, 2007, pp. 1–27.
- [5] "Asociación de cultivadores de caña de azúcar en Colombia. Asocaña". Fecha de consulta: Febrero 2009. Disponible: <http://www.asocana.com.co>
- [6] "Energy research Centre of the Netherlands (ECN), E. r. (n.d.). Phyllis". Fecha de consulta: Marzo 10 de 2009, Disponible en: <http://www.ecn.nl/phyllis/>
- [7] S. Priyadarsan, K. Annamalai, J.M. Sweeten, M. Holtzapfle. "Co-gasification of blended coal with feedlot and chicken litter biomass". *Proc Combust Inst*, Vol. 30, No. 2, 2005, pp. 2973–2980.
- [8] L. Young, C. Pian. "High temperature, air-blown gasification of dairy-farm wastes for energy production". *Energy*, Vol. 28, No. 7, 2003, pp. 655–72.
- [9] W. Jangsawang, A. Klimanek, A.K. Gupta. "Enhanced yield of hydrogen from wastes using high temperature steam gasification". *J Energy Res Technol*. Vol. 128, No. 3, 2006, pp. 179–85.
- [10] D. Ferdous, A.K. Dalai, S.K. Bej, R.W. Thring. "Production of H_2 and medium heating value gas via steam gasification of lignins in fixed-Bed reactors". *J Can Chem Eng*. Vol. 79, No. 6, 2001, pp. 913–22.
- [11] T. Galloway, J. Waidl, K. Annamalai, J.M. Sweeten, T. Tomlinson, D. Weigle. "Energy resources recovery applications using gasification and steam reforming". *Biannual incineration and thermal alternatives*. Conference. New Orleans: 2002.
- [12] S. Kalisz, C. Lucas, A. Jansson, W. Blasiak, D. Szewczyk. "Continuous high temperature air/steam gasification (HTAG) of biomass". *6th Int. Conference on Science in Thermal and Chemical Biomass Conversion*, Victoria, Canada, 30 Aug. - 2 Sept. 2004.
- [13] J. Gil, J. Corella, M.P. Azner, M.A. Caballero. "Biomass gasification in atmospheric and bubbling fluidized bed: effect of the type of gasifying agent on the product distribution". *Biomass and Bioenergy*, Vol. 17, No. 5, 1999, pp. 389–403.
- [14] P. De Filipis, C. Borgianni, M. Paolucci, F. Pochetti. "Gasification process of Cuban bagasse in a two-stage reactor". *Biomass and Bioenergy*, Vol. 27 No. 3, 2004, pp. 247–252.
- [15] L.F. Pellegrini and S. de Oliveira. "Exergy analysis of sugarcane bagasse gasification". *Energy*. Vol. 32, No. 4, 2007, pp. 314–327.
- [16] G. Gordillo, K. Annamalai, N. Carlin. "Adiabatic fixed-bed gasification of coal, dairy biomass, and feedlot biomass using an air–steam mixture as an oxidizing agent". *Renewable Energy*, In Press, Corrected Proof, Available online, 12 July 2009.
- [17] K. Annamalai, I. Puri. *Combustion science and engineering*. 1st ed. CRC Press: 2006.
- [18] G. Gordillo, K. Annamalai. "Gasification of coal and dairy manure with air-steam as oxidizing agent". *ASME-JSME Thermal engineering summer heat transfer conference*, Vancouver, Canada, July 2007.