

Estudios paramétricos de la gasificación de la tusa de maíz en gasificadores downdraft

Parametric studies of the corn cob gasification in downdraft gasifiers

Ing. José Alfonso Martillo-Aseffe^I, Dr. René Lesme-Jaén^{II},
MSc. Aldemar Martínez-González^{III}, Dr. Luis Oscar Oliva-Ruiz^{II}, MSc. Lenin Santiago
Orozco-Cantos^{IV}, Dr. Electo Eduardo Silva-Lora^{III}

jmartillo@yahoo.com

^IUniversidad Católica de Santiago de Guayaquil, Ecuador; ^{II}Universidad de Oriente, Cuba

^{III}Universidad Federal de Itajubá, Brasil; ^{IV}Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Ecuador

Resumen

En este trabajo se presenta una revisión al estado del arte de los estudios paramétricos sobre la gasificación de la tusa: composición, valor calórico del gas, tipos de gasificadores y parámetros de operación como: relación de equivalencia, producción específica de gas y rendimiento en frío del gasificador. Son incluidas las pruebas experimentales realizadas por los autores en el laboratorio de termodinámica de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Superior del Chimborazo, Ecuador, así como, un modelo estequiométrico, para evaluar los parámetros de operación del gasificador. Los resultados de los estudios muestran que en los gasificadores de lecho fijo la composición del gas producto de la gasificación de la tusa con aire presenta los siguientes valores CO (9,42-27,00 vol %), H₂ (4,50-20,00 vol %), CH₄ (1,54-2,80 % vol), CO₂ (7,40-17,99 % vol), N₂ (50,00-65,85 % vol), O₂ (0,00-1,61% vol), Hidrocarburos leves (0,05-0,39,% vol), el poder calorífico del gas entre 4-6 MJ / Nm₃ y el rendimiento en frío de los gasificadores entre 60-70 %. En las pruebas realizadas en el gasificador objeto de estudio con una relación de equivalencia de 0,39 se obtiene un gas con un poder calorífico de 3,82 MJ/Nm₃, que puede ser utilizado en motores de combustión interna.

Palabras clave: biomasa, gasificación, parámetros.

Abstract

In this paper a review of the state of the art of the parametric studies on the corncob gasification is presented: composition and gas caloric value, types of gasifiers and operation parameters such as: Equivalence ratio, specific gas production and cold yield of the gasifier. Experimental tests carried out by the authors are included in the thermodynamics laboratory of Mechanical Engineering Faculty in the Chimborazo Higher School, Ecuador, as well as a stoichiometric model to evaluate the operating parameters of the gasifier. The results show that in fixed-bed gasifiers, the composition of the gas produced by the corncob air gasification presents the following values CO (9,42-27,00 vol %), H₂ (4,50-20,00 vol %) and CH₄ (1,54 -2,80 % vol), CO₂ (7,40-17,99 % vol), N₂ (50,00-65,85 % vol), O₂ (0,00-1,61% vol), light hydrocarbons (0,05-0), 39 % vol).The calorific value gas is between 4-6 MJ/Nm³ and the cold yield of the

gasifiers between 60-70 %. In the tests carried out on the gasifier under study with an equivalence ratio of 0,39, a gas with a calorific value of 3,82 MJ / Nm₃ is obtained, which can be used in internal combustion engines.

Keywords: biomass, fixed bed gasifiers, parameters.

Introducción

La biomasa ha sido una de las principales fuentes de energía para la humanidad desde los albores de la civilización, y aunque su importancia disminuyó después de la expansión del petróleo y el carbón a fines del siglo XIX, en los últimos años ha habido un renovado interés en la energía de biomasa ocasionado por los problemas ambientales derivados del uso de los combustibles fósiles, las potencialidades de la biomasa como fuente de energía y los beneficios que ella ofrece desde el punto de vista medioambiental.

La biomasa es una fuente de energía renovable ampliamente disponible y distribuida en el mundo, su conversión es una fuente carbono neutral, tiene el potencial para proporcionar empleo en las zonas rurales y puede sustituir a los combustibles fósiles en todos los mercados de energía, producción de calor, electricidad y combustibles para el transporte.

Actualmente alrededor del 11 % del consumo de energía primaria del mundo se garantiza con la biomasa y las estimaciones indican que entre el 15 % y el 50 % del consumo de energía primaria podría provenir de la biomasa para el año 2050 [1].

Las fuentes y tipos de biomasa son distintas en cada país, sin embargo, dado el aumento sostenido de la producción agropecuaria, especial interés muestran los residuos de las cosechas agrícolas. En el caso de Ecuador la cosecha de maíz constituye un rico patrimonio de tradiciones agrícolas y alimenticias, no obstante, poco se ha tomado en cuenta que residuos, como la tusa, poseen también un alto contenido energético y evaluar sus potencialidades como combustible bioenergético constituye una etapa importante para su futuro aprovechamiento.

En el presente trabajo se presenta un análisis del estado del arte de los estudios paramétricos realizados sobre la gasificación de la tusa, donde se

especifican la composición y valor calor del gas, tipos de gasificador, parámetros de operación tales como: relación de equivalencia, tasa de producción de gas y eficiencia en frío del gasificador, se incluyen los resultados experimentales de las pruebas gasificación de la tusa realizadas por los autores de éste trabajo, así como, un modelo estequiométrico que permite evaluar los parámetros del proceso, a través de balances de masa y energía en el gasificador.

Fundamentación teórica

Los estudios paramétricos de la gasificación se desarrollan para evaluar los parámetros termodinámicos del gasificador fundamentalmente: Consumo de biomasa, poder calorífico y flujo de gas generado, relación de equivalencia, eficiencia entre otros. Los resultados de estos estudios dependen del tipo de gasificador, agente de gasificación, biomasa utilizada y parámetros de operación.

Tipos de gasificadores

La elección de un tipo de gasificador está determinada por las características de la biomasa (tamaño, contenido de humedad y contenido de cenizas) y condiciones de calidad del gas para su empleo. En el caso de la tusa se han utilizado fundamentalmente gasificadores de lecho fijo concurrente (*Downdraft*) y contra corriente (*Updraft*) (Fig. 1)

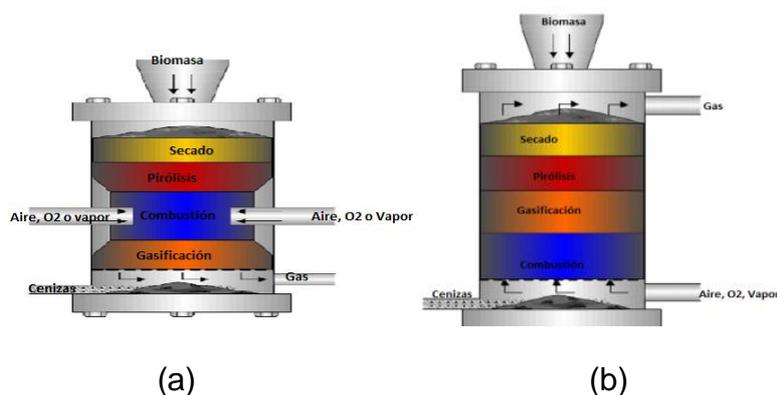


Fig. 1. Gasificadores de lecho fijo, (a) Downdraft, (b) Updraft.

La diferencia entre estos gasificadores está dada por el movimiento relativo de la biomasa y el gas generado. En el gasificador *downdraft* la biomasa es

suministrada por la parte superior y el agente de gasificación por la pared lateral, la biomasa y el gas generado se mueven en sentido descendente. Las principales ventajas de este tipo de gasificador es su alta eficiencia en la conversión de carbono, además de producir un gas con bajo contenido de alquitrán y cenizas, son muy utilizados para el uso del gas en motores de combustión interna a pequeña escala [2,3].

En el gasificador *Updraft* el combustible es suministrado por la parte superior y el agente de gasificación por la parte inferior, la biomasa se mueve en sentido descendente y el gas se mueve en sentido ascendente. Las principales ventajas de este tipo de gasificador es su simplicidad, alta eficiencia térmica, son más indicados para aplicaciones del gas en generación de calor.

Agentes de gasificación

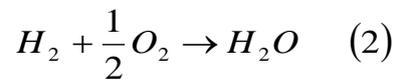
En la gasificación como agentes oxidantes se puede emplear aire, oxígeno, dióxido de carbono, vapor de agua o una mezcla de estos. El proceso con aire genera un gas de bajo poder calorífico de alrededor de 4 a 6 MJ/Nm³, debido a los altos contenidos de N₂. Cuando se utiliza mezclas de aire y vapor de agua u oxígeno se obtiene un gas con un poder calorífico superior al 6MJ/Nm³ [4,5].

El proceso de gasificación de biomasa

La gasificación es definida como la conversión térmica de la biomasa en un gas a través de una serie de reacciones químicas que ocurren a altas temperaturas en condiciones sub estequiometrias (en defecto de oxígeno). Este proceso incluye cuatro etapas: secado, pirólisis, reducción (gasificación) y oxidación, distribuidas por zonas en el caso de los gasificadores de lecho fijo como se observa en la figura 1.

La etapa de secado ocurre aproximadamente 100-200°C y en ella el contenido de humedad de la biomasa es típicamente reducido a valores menores al 5 %. La pirólisis es la degradación térmica de la biomasa. En ella la biomasa es calentada en ausencia de aire hasta aproximadamente 350 °C, obteniéndose fundamentalmente carbón, gases y alquitrán.

La combustión es la reacción química exotérmica entre biomasa carbonizada sólida y oxígeno presente en el aire, lo que resulta en la formación de CO₂ (Ec. 1). El Hidrógeno presente en la biomasa también se oxida para generar agua (Ec. 2).



En ausencia de oxígeno, ocurren varias reacciones de gasificación en el rango de temperatura de 800-1000 °C. Estas reacciones son endotérmicas y las de mayor relevancia son representadas por las siguientes ecuaciones.



La composición y las propiedades del gas producto de la gasificación dependen de factores como el tipo de gasificador, parámetros del proceso, agente de gasificación y tipo de biomasa [4-10].

Temperatura

La temperatura es considerada el principal parámetro para evaluar el comportamiento del gasificador. Un aumento de la temperatura conduce a un aumento en la producción de gas, una disminución del contenido de alquitrán en el gas (mayor calidad) y del carbón en el gasificador (mayor conversión del carbono en gas).

Relación de equivalencia

La relación de equivalencia (ER) es el parámetro de mayor influencia en el proceso de gasificación, con un impacto significativo en la composición y producción de gas. Ella es determinada por la siguiente relación:

$$ER = \frac{V_a}{V_a^o} = \frac{R_{A/B \text{ actual}}}{R_{A/B \text{ st}}} \quad (7)$$

donde:

V_a . Volumen de aire suministrado al gasificador (Nm^3/h).

V_a° . Volumen de aire necesario para la combustión completa (Nm^3/h)

$R_{A/B \text{ actual}}$. Relación aire combustible real, Nm^3/kg de biomasa.

$R_{A/B \text{ st}}$. Relación aire combustible estequiométrica, Nm^3/kg de biomasa, se calcula a partir de los elementos químicos del combustible (Ec. 8) [11].

$$R_{A/B \text{ st}} = 0,0889(C + 0,375.S) + 0,265.H - 0,333.O \quad (8)$$

Gasificación de la tusa

Los resultados de las primeras investigaciones sobre los estudios paramétricos de la gasificación de la tusa fueron publicados en los años 1972 y 1979[12,13]. El objetivo de estas investigaciones era evaluar la composición y el valor calórico del gas producido que era utilizado como combustible en hornos para calentar aire, que posteriormente era utilizado para el secado de semillas en granjas agropecuarias.

En los años posteriores las investigaciones sobre la gasificación de la tusa se orientaron hacia el uso del gas en motores de combustión interna para la generación de electricidad, así como, el desarrollo de modelos de equilibrio para evaluar los efectos del contenido de humedad en la composición del gas generado [14,15-19].

Los resultados de estos trabajos muestran que para producir 1 kWh de energía se consume 1 kg de tusa, que con el aumento de la humedad de la biomasa, la cantidad de CO disminuyó, contrariamente el resto de los componentes CO_2 , H_2 , vapor de agua se incrementan. Con el aumento de la temperatura hubo un incremento del monóxido CO y H_2 . En la tabla 1 se muestra un cuadro resumen

de los parámetros del proceso de gasificación de la tusa utilizando aire como agente de gasificación.

Tabla 1
Composición, poder calorífico del gas y parámetros del proceso de la gasificación de la tusa con aire

No	Gasificador	Composición del gas (%vol.) en base seca							LVH _g (MJ/Nm ³)	G _g (Nm ³ /kg)	η _c (%)	Ref.
		CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	N ₂	O ₂	C ₂ H ₄				
1	Updraft	24,7	7,5	1,9	8,0	56,0	1,6	nd	nd	nd	nd	/9/
2	Updraft	27,1	8,0	2,8	7,4	54,0	0,6	nd	nd	nd	nd	/9/
3	Downdraft	20,0	20,0	nd	10,0	50,0	nd	nd	4,5	nd	nd	/10/
4	Downdraft	22,6	17,3	2,3	12,3	nd	nd	0.4	5,8	2,0	67,0	/14/
5	Downdraft	15,4	15,5	1,6	14,0	nd	nd	nd	4,58	2,1	62,8	/15/
6	Downdraft	9,42	4,50	1,7	17,9	65,8	nd	nd	nd	nd	70,7	/16/
7	Downdraft	13,1	17,0	1,5	nd	nd	nd	nd	6,31	2,9	nd	/17/

Legenda: nd. No disponible.

Los resultados muestran una gran variedad de valores, en cuanto a la composición de gas producido, lo cual obedece a las diferencias de las características de la biomasa utilizada (tusa), así como, los diferentes parámetros operacionales de los gasificadores fundamentalmente la temperatura y ER, las cuales no se especifican, hecho que pone de manifiesto la necesidad de seguir realizando estudios paramétricos sobre el tema.

Estudio paramétrico de la gasificación de la tusa. Métodos utilizados y condiciones experimentales

Biomasa utilizada

Las muestras de las tusas objeto de estudio (Humedad 10 %) fueron tomadas en las provincias de Los Ríos y Guayas de Ecuador y sus características fueron determinadas en los Laboratorios del Centro de Excelencia y Generación Distribuida (NEST) de la Universidad Federal de Itajubá, Brasil, en la tabla 2 se presentan los resultados.

Tabla 2
Características de las tusas

Análisis Elemental (% másico), base seca y libre de cenizas.		Normas
Elementos	Valores	
Carbono (C)	48,50	ASTM D 5373-08
Hidrógeno (H)	5,64	
Oxígeno (O)	45,46	
Nitrógeno (N)	0,40	
Azufre (S)	0,01	
Análisis Inmediato (% másico)		
Cenizas	1,73	ASTM D 3175
Volátiles	79,36	ASTM D 3174
Carbón fijo	17,14	ASTM D 3172
Humedad	1,77	ASTM D 3173
Poder calorífico bajo (MJ/kg), base seca		
17,90		

Instalación experimental

Las pruebas experimentales de la gasificación de la tusa se realizaron en el Laboratorio de Termodinámica de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo (ESPOCH), Ecuador. El esquema de la instalación se presenta en la Fig. 2.

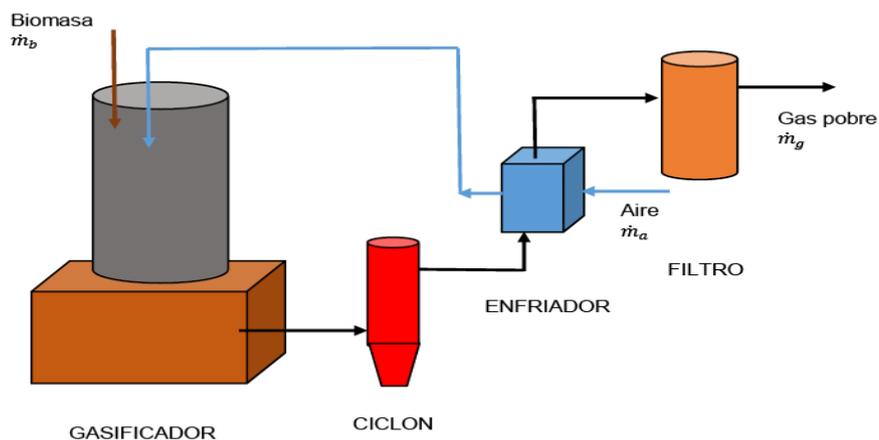


Fig. 2. Esquema de la instalación de laboratorio.

El gasificador es del tipo *downdraft*. El gas producido pasa por el ciclón donde se separan las partículas gruesas, luego entra en un calentador de aire y finalmente pasa por un filtro de mangas para separar las partículas finas.

Técnica experimental

Inicialmente se efectúa el encendido del gasificador (cargado de biomasa) a través del cenicero, luego se procede suministrar aire en exceso al gasificador para combustionar parte de la biomasa hasta alcanzar la temperatura de operación estable, manteniendo un régimen de alimentación entre (20-40) kg de tusa cada una hora de trabajo. Las condiciones para las cuales se desarrollaron los experimentos se reportan en la tabla 3.

Tabla 3
Condiciones experimentales

No	W _b (%)	V _a (m ³ /h) _{25 °C}	m _a (kg/h) _{25 °C}	T _a (°C)	T _{ga} (°C)	T _g (°C)	T _{ref} (°C)	ER
1	10,00	57,00	68,40	80,00	900	600	25,00	0,23
2	10,00	67,24	80,69	80,00	900	600	25,00	0,12
3	10,00	48,57	58,28	80,00	900	600	25,00	0,39
4	10,00	60,60	71,92	80,00	900	600	25,00	0,47
5	10,00	44,93	53,91	80,00	900	600	25,00	0,63

Legenda: W_b. Humedad de la biomasa. V_a. Flujo volumétrico de aire suministrado al gasificador. m_a. Flujo másico de aire. T_a. Temperatura del aire a la entrada del gasificador. T_{ga}. Temperatura de gasificación. T_{gs}. Temperatura de salida del gas. T_{ref}. Temperatura de referencia.

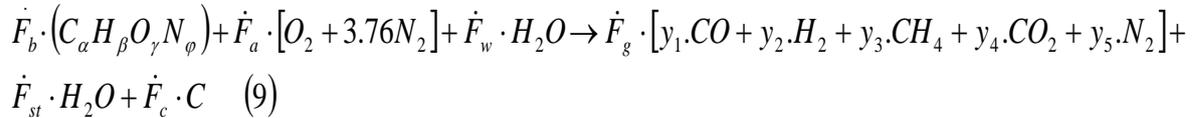
Después de estabilizada la temperatura del gasificador, durante un período de tiempo se tomaron muestras de gases después del filtro, muestras que son almacenadas y sometidas a un análisis cromatográfico (Norma ASTM D 1945-03 del 2010) en el laboratorio de análisis instrumental del Departamento de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional en la ciudad de Quito. Los resultados de estos análisis se muestran en la tabla 5.

Tabla 5
Composición del gas de la gasificación de la tusa en base húmeda

No	H ₂	O ₂	N ₂	CO	CH ₄	CO ₂	C ₆ H ₆	H ₂ O
1	19,05	4,18	24,58	0,52	10,27	39,82	0,99	0,60
2	29,96	1,21	18,21	0,62	12,33	35,89	1,13	0,65
3	24,52	2,29	58,63	3,47	1,88	8,19	0,09	0,95
4	30,66	1,97	16,57	0,79	8,34	40,15	0,70	0,81
5	8,50	1,88	36,55	3,08	1,61	46,65	0,25	1,49

Balance de masa y energía en el gasificador

Para realizar el balance de masa y energía en el gasificador se desarrolló un modelo estequiométrico a partir de la ecuación general de la gasificación (Ec. 9).



donde:

Los subíndices α , β , γ , ϕ , representan los moles de C, H, O, N en la biomasa gasificada en base seca y (y_1 , y_2 , y_3 , y_4 , y_5) la composición en volumen de los gases, obtenidas a partir del análisis cromatográfico.

Balance del carbono.

$$\dot{F}_b \cdot \alpha = \dot{F}_g (y_1 + y_3 + y_4) + \dot{F}_c \quad (10)$$

Balance del Hidrógeno.

$$\dot{F}_b \cdot \beta + 2\dot{F}_w = \dot{F}_g (2y_2 + 4y_3) + 2\dot{F}_{st} \quad (11)$$

Balance del Oxígeno.

$$\dot{F}_b \cdot \gamma + 2\dot{F}_a + \dot{F}_w = \dot{F}_g (y_1 + 2y_4) + \dot{F}_{st} \quad (12)$$

Balance del Nitrógeno.

$$\dot{F}_b \cdot \phi + 7.52 \dot{F}_a = 2 \cdot \dot{F}_g \cdot y_5 \quad (13)$$

Flujo molar de aire.

$$\dot{F}_a = \frac{V_{aire} \cdot \rho_{aire}}{3600 \cdot 4.76 \cdot M_{w_{aire}}} \quad (14)$$

donde:

ρ_{aire} . Densidad del aire, Kg/m³

M_{Waire} . Peso molecular del aire, kg/kmol.

Flujo molar de carbón no convertido.

Se considera un porcentaje másico de 15% de CF en las cenizas en correspondencia con los valores obtenidos a partir de los análisis de cenizas realizados por los autores [2,4].

$$\dot{F}_c = \frac{0,05 \cdot CF \cdot m_b}{M_{W_c}} \quad (15)$$

Flujo molar de humedad procedente de la biomasa

$$\dot{F}_w = W_b \cdot F_b \quad (16)$$

Consumo másico de biomasa.

$$m_b = W_b \cdot F_b \quad (17)$$

El modelo programado en Excel no considera la formación de alquitrán y cualquier elemento de este tipo lo considera como metano, lo cual se justifica por el bajo contenido de alquitrán en los gases en los gasificadores *downdraft* [2].

La figura 3 y la tabla 6 muestran las corrientes principales consideradas, y las ecuaciones de balance masa y energía respectivamente, mientras que la tabla 7 presenta las correlaciones polinómicas utilizadas para el cálculo de calor específico de los componentes gaseosos presentes en el gas. Modelos similares han sido utilizados para evaluar los parámetros de gasificadores *downdraft* operando con otros tipos de biomasa [4,20, 21].

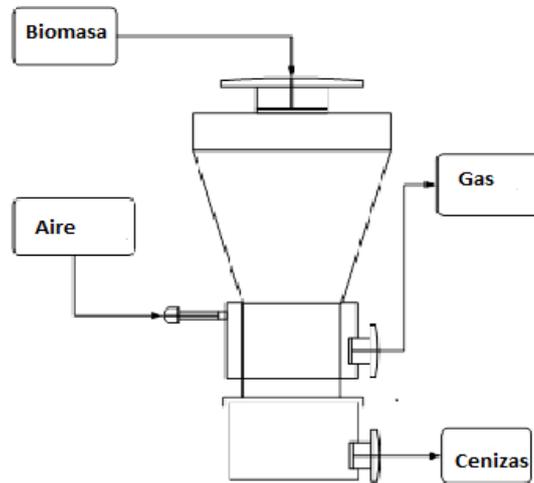


Fig. 3. Entradas y salidas de masa y energía del gasificador.

Tabla 6
Ecuaciones de balance de masa y energía

Item	Ecuaciones	N°
Balance de masa	$\dot{m}_b + \dot{m}_a = \dot{m}_g + \dot{m}_{wb} + \dot{m}_{ash}$	Ec. 18
Balance de Energía	$\dot{E}_b + \dot{E}_a = \dot{E}_g + \dot{E}_{ch} + \dot{E}_p$	Ec. 19
Energía de la Biomasa	$\dot{E}_b = \dot{m}_b \cdot LHV_b$	Ec. 20
Entalpía del aire	$\dot{E}_a = \dot{m}_a \cdot C_{p_a} \cdot (T_a - T_{ref})$	Ec. 21
Energía Total del gas producido	$\dot{E}_g = \dot{E}_s + \dot{E}_{ch}$	Ec. 22
Entalpía del gas producido	$\dot{E}_s = \frac{\dot{m}_g \cdot C_{p_g} \cdot (T_g - T_{ref})}{W_g \cdot 3600}$	Ec. 23
Calor específico del gas producido	$C_{p_g}(T_g) = \sum_{i=1}^{i=5} y_i \cdot C_{p_{g,i}}(T_g)$	Ec. 24
Energía química del gas producido.	$\dot{E}_{ch} = 22400 \cdot \dot{F}_g \cdot LHV_g$	Ec. 25
Poder calorífico del gas producido	$LHV_g = \sum_{i=1}^{i=3} (y_i \cdot LHV_i)$	Ec. 26
Eficiencia en frío del gasificador.	$\eta_c = \frac{\dot{E}_{ch}}{\dot{m}_b \cdot LHV_b}$	Ec. 27
Producción específica de gas	$G_{gas} = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_b}$	Ec.28

Leyenda: \dot{m}_g . Flujo másico de gas producido en base seca, (kg/s). \dot{m}_{ash} . Flujo másico de residuos (Cenizas, carbón no convertido y material volátil), (kg/s). \dot{m}_{wb} . Flujo másico de la humedad en la biomasa, (kg/s). LHV_b . Poder calorífico bajo de la biomasa, (MJ/kg). LHV_i . Valor calórico bajo de cada componente del gas producido (MJ/Nm³). C_{p_g} . Calor específico del gas, (kJ/kg). $C_{p_{g,i}}$. Calor específico de cada componente del gas (kJ/kg). W_g . Peso molecular del gas, (kg/Kmol)

Tabla 7
**Calor específico de componentes gaseosos presión
 constante [4,11,22]**

Componentes	Calores específicos	Rango de validez (K)	Nº
H ₂ O	$C_{p_{ws}} = 34.4 + 0.000628 \cdot T_g + 0.0000052 \cdot T_g^2$	273 - 2500	Ec. 20
CO	$C_{p_{CO}} = 27.62 + 0.005 \cdot T_g$	273 - 2500	Ec. 21
H ₂	$C_{p_{H_2}} = 20.71 + 0.0034 \cdot T_g$	273 - 2500	Ec. 22
CH ₄	$C_{p_{CH_4}} = 22.35 + 0.048 \cdot T_g$		Ec. 23
CO ₂	$C_{p_{CO_2}} = 43.28 + 0.0114 \cdot T_g - \frac{818363}{T_g^2}$	273 - 1200	Ec. 24
N ₂	$C_{p_{N_2}} = 27.21 + 0.0042 \cdot T_g$	273 - 5000	Ec. 25

Resultados y discusión

Resultados de las pruebas de gasificación

En los resultados de las pruebas de gasificación de las tusas se aprecian elevadas concentraciones de CO₂ en los gases, producto de los valores elevados de relación aire combustible real utilizada, verificado por la presencia de concentraciones elevadas de oxígeno en los gases. Sin embargo en la prueba número 3 las concentraciones de los gases obtenidas están dentro del rango de las reportadas por otros autores (tabla 1).

Resultados del balance de masa

En la tabla 8 se presentan los resultados del balance de masa para cada una de las pruebas realizadas, obsérvese la producción específica de gas (G_{gas}) está en el orden de los 2 Nm³/kg de biomasa húmeda en correspondencia con los resultados mostrados en la tabla 1, sólo los valores obtenidos en la prueba 6 son superiores a los 3 Nm³/kg de biomasa húmeda debido a los elevados valores de ER utilizados en esta prueba.

Tabla 8
Resultados balance de masa

N _o	m _{b.af} (kg/h)	m _{b.s} (Kg/h)	m _{b.w} (kg/h)	m _{w. b} (kg/h)	m _{asc} (kg/h)	m _{gas} (kg/h)	V _{gas} (Nm ³ /h)	G _{gas} (Nm ³ /Kg _{b.w})
1	40,03	40,61	50,76	10,15	0,71	102,30	87,02	1,71
2	80,52	81,67	102,08	20,42	1,43	160,92	150,32	1,47
3	23,84	24,18	30,22	6,04	0,42	82,04	73,34	2,43
4	53,88	54,65	68,31	13,66	0,96	125,61	117,89	1,73
5	14,84	15,05	16,73	1,67	0,26	68,71	55,04	3,29

Resultados del Balance de Energía

La tabla 9 recoge los resultados del balance de energía, donde se observa un elevado poder calorífico del gas, dado por el elevado por ciento del contenido de metano en el mismo, manifestándose un predominio de la reacción de metanización (Ec. 6) durante las pruebas realizadas. También se pone de manifiesto que el rendimiento en frío del gasificador durante las pruebas está en correspondencia con el rango de valores reportados por otros autores en la tabla 1.

Tabla 9
Resultados balance de Energía

No	E _{aire} kW	E _b kW	E _{gas} kW	E _{per} kW	E _{ch} kW	E _s kW	LVH _{gas} MJ/Nm ³	η _c
1	1,24	252,39	224,37	10,1	193,58	30,79	6,19	76,70
2	1,47	507,56	506,54	20,30	455,28	51,26	8,19	89,70
3	1,06	150,26	124,41	6,06	100,67	23,75	3,82	67,00
4	1,31	339,65	330,45	13,59	290,06	40,42	6,71	85,40
5	0,98	83,19	40,08	3,18	32,11	15,97	2,00	38,6

En la tercera prueba (3), la más representativa del proceso de gasificación por los valores de ER utilizados (ER=0,39) se logra una eficiencia en frío del gasificador del 67%, en el orden de los valores reportados por otros autores (tabla 1) y un valor calórico del gas de 3,82 MJ/Nm³ de gas, valor que se

encuentra por encima del límite inferior para ser usado en motores de combustión interna (2.81 MJ/Nm^3) [23,24].

Conclusiones

El gas producto de la gasificación de la tusa se ha usado con éxito para el secado de semillas y en motores de combustión interna para operar sistemas de riego y generación de electricidad a pequeña escala.

Los estudios paramétricos de la gasificación de la tusa reportados en la literatura muestran que en un gasificador downdraft se pueden producir entre $2-3 \text{ Nm}^3$ de gas/kg de biomasa con un valor calórico bajo entre $4-6 \text{ MJ/Nm}^3$ y una eficiencia en frío del gasificador entre 60-70%.

Las pruebas realizadas en el gasificador muestran una gran influencia de la relación de equivalencia en la eficiencia en frío del gasificador y en el poder calorífico del gas. Con valores de $ER= 0,39$ se puede obtener un gas con un valor calórico de $3,82 \text{ MJ/Nm}^3$, superior al límite inferior para poder ser usado en motores de combustión interna.

Agradecimientos

Al laboratorio de Termodinámica de la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Ecuador y a las Agencias de Financiamientos CNPq, Capes, y Fapemig de Brasil.

Referencias bibliográficas

1. DEMIRBAS MF, BALAT M, BALAT H. Potential contribution of biomass to the sustainable energy development. *Energy Conversion and Management*; 2009, 50, pp.1746–60.
2. GALINDO A. L., SILVA LORA E., VIERA ANDRADE R., Y. GIRALDO S., LESME JAÉN R., MELIAN COBAS V. Biomass gasification in a downdraft gasifier with a two-stage air supply: Effect of operating conditions on gas quality. *Biomass and Bioenergy*, 2014, 61, pp. 236-244

3. RUIZ, J. A, JUAREZ M. C, MORALES M. P, MUNOZ P, MENDIVIL M. A. Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 18, pp.174–183.
4. VILAS BÔAS DE SALES C. Ap., *et.al* “Experimental study on biomass (eucalyptus spp.) gasification in a twostage downdraft reactor by using mixtures of air, saturated steam and oxygen as gasifying agents. *Energy Conversion and Management*, 2017, 145, pp. 314–323
5. WANG Y, KINOSHITA CM. Experimental analysis of biomass gasification with steam and oxygen. *Solar Energy* 1992, 49, pp. 153-8.
6. BALAT Mustafa; BALAT Mehmet; KIRTAY, Elif; BALAT, Hayva. Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 2: Gasification systems. *Energy Conversion and Management*, 2009. 50, pp. 3158-3168.
7. GIELEND olf. *Renewable energy technologies: Cost analysis series* [Online]. IRENA. June-Septembro 2012. Referencia 16 de Junio 2017. Disponible en Web: <http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/RE.Technologies.CostAnalysis.BIOMASS.pdf>. - 1.
8. SADAKA S. *Gasification*. Informe inédito. Department of Agricultural and Bio Systems Engineering Iowa State University 1521 West F. Ave. Nevada, IA 50201, 2012, 20p
9. STEVENS D.J. *Hot Gas Conditioning: Recent Progress with Larger-Scale Biomass Gasification Systems* Informe inédito. NREL/SR-510-29952 / National Renewable Energy Laboratory. - Golden, CO: [s.n.], 2001, 88p.
10. VANN Bush. *GTI Gasification Overview*. Informe inédito GTI Energy Technology Forum June 3, 2009, 10p
11. BASU, P. *Boilers and Burners. Design and Theory*. Editorial Springer, Nueva York 2000. ISBN: 0387987037

12. STANLEY L. Bozdech. *Use of corn cobs for seed drying through gasification*. Informe inédito. DEKALB Ag. Research, Inc., Sycamore Rd., DeKalb, Illinois, 60115, 1972, 10p.
13. OTTO C, DOERING I, TIMOTHY J. O' Hare and PEART Robert M. Small scale gasification of biomass. The case of corn cob gasifiers. *Energy*, 1979, Vol. 4. pp. 235-248.
14. RAJVANSHI Anil K. Biomass gasification. Published as a Chapter No. 4 in book "Alternative Energy in Agriculture", Vol. II, Ed. D. Yogi Goswami, CRC Press, 1986, pp. 83-102.
15. PANOTE Wilaipon and CHUN CHE Fung. A study on a corn cob gasifier engine-generator for electricity generation in Northern Thailand using the equilibrium Model. Referencia 16 de Junio 2017. Disponible en la Web: <http://143.16.65.129/-cgplhome/estimatio-no f qower.pdf>. 0-7803-7459 2002 IEEE
16. BIAGINI E., BARONTINI F., TOGNOTTI L., Gasification of agricultural residues in a demonstrative plant: Corn cobs. *Bioresource Technology*, 2014, 173, pp.110–116
17. ARUNAND K. M. RAMANANV en kata. Comparative studies on gasification of corn cob, Casuarina wood and coconut shell in a fixed bed gasifier. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 2016, 8 pp.544-552
18. SUHARTONO Bayu, DWI Prasetyo and IKRIMAH NUR Azizah. Synthetic gas (syngas) production in downdraft corn cob gasifier and its application as fuel using conventional domestic (lpg) stove. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016, 11(8), pp.200-15.
19. MUHAMMAD MUBASHAR O., ANJUM Munir, MANZOOR Ahmad, ASIFTanveer. Downdraft gasifier structure and process improvement for highquality and quantity producer gas production. *Journal of the Energy Institute*, 2017, 30, pp.1-11.
20. LESME JAÉN R, MARTÍNEZ D. J., VIERA ANDRADE R, SILVA LORA E. Evaluación teórico experimental de un sistema avanzado gasificador

- de biomasa / motor reciprocante para la generación de electricidad. (Parte I). *Revista Tecnología Química*. 2011, 31(2). pp. 53-63.
21. LESME JAÉN R, MARTÍNEZ D. J, VIERA ANDRADE R, SILVA LORA E. Evaluación teórico experimental de un sistema avanzado gasificador de biomasa / motor reciprocante para la generación de electricidad. (Parte II). *Revista Tecnología Química*, 2011, 31(3), pp. 23-30.
22. KREITH F. *Handbook of Thermal Engineering*. CRC Press LL, Boulder, Colorado Editorial., 2000, p.1183. ISBN 0-8493-9581-X
23. LESME JAÉN R., GARCIA FAURE L., O. RUIZ L., PAJARÍN RODRÍGUEZ Juan, REVILLA SUAREZ Dennis. Biomass Gasification for Power Generation Internal Combustion Engines. Process Efficiency. *Revista Ingeniería Química*, 2016, 36(2), pp. 45-59
24. LESME R, GARCÍA L., RECIO Á., O., Uso del gas pobre en motores de combustión interna para la generación de electricidad en Cuba. XX Congreso Brasileño de Ingeniería Química. COBEQ (14-17 de junio 2014, Ubatuba, Brasil, ISBN:2178-1802