

Análisis termodinámico de la gasificación por plasma de bagazo de caña

Thermodynamic analysis of plasma gasification of bagazo de caña

Ing. Jorge Jadid Tamayo-Pacheco^{1*}

DrC. José Ramón Copa-Rey²

Ing. Manuel Cantos-Macías³

DrC. Angel Luis Brito-Sauvanell¹

DrC. José Luz Silveira²

¹ Universidad de Oriente, Santiago de Cuba. Cuba

² São Paulo State University, Faculty of Engineering of Guaratinguetá, Brazil.

³ Universidad Técnica de Manabí, Ecuador

*Autor para la correspondencia. Correo electrónico: jadid@uo.edu.cu

RESUMEN

La gasificación térmica por plasma puede ser una de las tecnologías más pertinentes y respetuosas con el medio ambiente para el tratamiento de residuos y ha ganado interés para su uso en la termoconversión de biomasa. En esta perspectiva, el objetivo de este estudio es evaluar la gasificación del bagazo de caña de azúcar mediante el estudio de las áreas efectivas de operación de este proceso y establecer una comparación con la gasificación autotérmica convencional. Se utilizó un modelo de equilibrio termoquímico para calcular los indicadores que caracterizan el desempeño del proceso por si solo y en integración con un ciclo combinado. Como resultado se obtuvo que la gasificación por plasma y aire del bagazo es técnicamente factible para la producción eléctrica neta específica de 4 MJ con un 30 % de eficiencia eléctrica produciéndose un gas

con mayor poder calorífico que la gasificación autotérmica. Se determinaron los puntos de operación donde la producción de energía eléctrica y la eficiencia del gas frío alcanzan su mayor valor; a continuación fueron analizados los efectos de los parámetros operacionales sobre estos indicadores de desempeño.

Palabras clave: gasificación por plasma; modelo de equilibrio; análisis termodinámico; gasificación de bagazo de caña de azúcar.

ABSTRACT

Thermal plasma gasification can be one of the most relevant and environmentally friendly technologies for the treatment of waste and has gained interest for its use in the biomass thermalconversion. In this perspective, the aim of this study is to evaluate the gasification of sugar cane bagasse by studying the effective areas of operation of this process and to establish a comparison with conventional autothermal gasification. A thermochemical equilibrium model was used to calculate the indicators that characterize the performance of the process by itself and in integration with a combined cycle. As a result, plasma gasification of the bagasse was technically feasible for the specific net electric production of 4 MJ with 30% electrical efficiency, producing a gas with a higher calorific value than the autothermal gasification. The points of operation were determined where the production of electric energy and the efficiency of the cold gas reach their highest value; the effects of the operational parameters on these performance indicators were then analyzed.

Keywords: plasma gasification; equilibrium model; thermodynamic analysis; sugarcane bagasse gasification.

Recibido: 8/09/2018

Aceptado: 15/01/2019

Introducción

El consumo mundial de energía ha crecido de manera constante debido a una serie de razones, principalmente debido a la industrialización, al rápido crecimiento de los países en desarrollo y su población, al aumento de la calidad de vida y al aumento del transporte de personas y bienes. Para satisfacer estas necesidades, el uso extensivo de combustibles fósiles ha demostrado ser insostenible y una de las principales causas de la emisión de gases de efecto invernadero. La necesidad de fuentes renovables de energía que proporcionen bajas emisiones de tales gases es hoy más necesaria que nunca.

Dentro de los recursos de energía renovable, se espera que la biomasa sea una de las opciones predominantes, principalmente debido a su abundancia y manejabilidad. En la actualidad, importantes cantidades de biomasa se convierten principalmente en calor. Se estima que el 13% de la energía primaria global utilizada en todo el mundo es biomasa, la mayoría con niveles muy bajos de eficiencia cuando se quema al aire libre. ⁽¹⁾

En algunos países como Brasil y Cuba, la biomasa como fuente primaria se utiliza para obtener electricidad en los ingenios azucareros mediante la quema de bagazo. Este proceso puede mejorarse desde el punto de vista de la eficiencia, si se utilizan otras formas de conversión térmica como la gasificación. ⁽²⁾ Sin embargo, la gasificación es un proceso complicado, está sujeto a la influencia de múltiples factores y enfrenta estrictos requisitos tecnológicos, por lo que esta tecnología aún no se ha introducido en el sector del azúcar.

Una de las formas de gasificar la biomasa es a través del uso de plasma térmico como fuente del calor necesario para que ocurran las reacciones de gasificación esencialmente endotérmicas. Esta técnica ha sido probada fundamentalmente para el tratamiento de residuos sólidos urbanos, ⁽³⁾ carbón ⁽⁴⁾ y en otras biomásas. ⁽⁵⁾ A través de la gasificación por plasma es posible obtener un gas limpio adecuado para su uso en sistemas de turbinas de gas que permiten a los gasificadores integrados a un ciclo combinado (IGCC). ⁽⁶⁾ El uso de IGCC se reconoce como la forma de obtener más energía eléctrica de la gasificación, pero en el caso de la gasificación por plasma, se produce una disminución de la

energía neta debido al consumo eléctrico del gasificador. ⁽⁷⁾ Es por eso que se requieren estudios termodinámicos buscando mejoras en el desempeño del proceso.

En este documento, se aborda el análisis termodinámico a través de la evaluación de los criterios de desempeño de la gasificación por plasma como un proceso individual y de la operación del IGCC. Como método de análisis, se propone el uso de modelos para explorar las áreas efectivas de operación en busca de las zonas donde los criterios de rendimiento son máximos, así como los efectos de los parámetros operacionales.

Métodos utilizados y condiciones experimentales

Para realizar los cálculos y estimaciones del rendimiento de la gasificación de bagazo, en este estudio, se utilizó un modelo de equilibrio termoquímico. Este tipo de modelo goza de gran popularidad porque es relativamente simple y permite obtener resultados cercanos a la realidad, fundamentalmente en los gasificadores que operan a altas temperaturas y con tiempos de residencia del gas en los que se alcanzan estados cercanos al equilibrio teórico. Sin embargo, no concibe aspectos importantes como la cinética química y la dinámica de fluidos que se incorporan en otros tipos de modelos más complejos. ⁽⁸⁾

Como entradas del modelo se incluyen: la composición elemental de la biomasa y su humedad, la cantidad de aire que interviene en el proceso, la entalpía aportada a la reacción por el plasma térmico, y la relación del carbón no convertido. La composición final del syngas es la principal salida del modelo y constituye un elemento básico para luego calcular los criterios de desempeño.

La energía del plasma térmico se tiene en cuenta en el balance de energía como en ⁽⁹⁾ y se muestra en la ecuación 1.

$$\begin{aligned}
\Delta H_{f_{biomasa}}^{\circ} + w(\Delta H_{f_{H_2O}}^{\circ} + H_{(vap)}) + m(\Delta H_{f_{O_2}}^{\circ} + 3.76\Delta H_{f_{N_2}}^{\circ}) + Q_{Plasma} & \quad (1) \\
= x_{CO}\Delta H_{f_{CO}}^{\circ} + x_{CO_2}\Delta H_{f_{CO_2}}^{\circ} + x_{H_2O}\Delta H_{f_{H_2O}}^{\circ} + x_{CH_4}\Delta H_{f_{CH_4}}^{\circ} \\
+ \Delta T(x_{H_2}Cp_{m_{H_2}} + x_{CO}Cp_{m_{CO}} + x_{CO_2}Cp_{m_{CO_2}} + x_{H_2O}Cp_{m_{H_2O}} \\
+ x_{CH_4}Cp_{m_{CH_4}} + (3.76m + bN)Cp_{N_2}) + ncC \cdot Cp_{mC}
\end{aligned}$$

Donde: ΔH_{fi}° es la entalpía de formación de la sustancia i [kJ/kmol]

w contenido de agua en la biomasa [mol]

m cantidad de aire involucrada en la reacción [mol]

Q_{Plasma} entalpía aportada por el plasma térmico [kJ]

x_i cantidad de la sustancia i presente en los productos [mol]

Cp_{mi} calor específico medio de la sustancia i [kJ/(kmol·K)]

ΔT diferencia de temperatura entre la temperatura de gasificación y 298 K°
[K°]

ncC fracción de carbón no convertido [mol]

$H_{(vap)}$ entalpía de vaporización del agua [kJ/kmol]

Otras ecuaciones en el modelo son el balance de masa de Carbono, Hidrógeno y Oxígeno como se plantea en algunas literaturas. ⁽¹⁰⁾

$$bC = x_{CO} + x_{CO_2} + x_{CH_4} + ncC \quad (2)$$

$$2w + bH = 2x_{H_2} + 2x_{H_2O} + 4x_{CH_4} \quad (3)$$

$$w + bO + 2m = x_{CO} + 2x_{CO_2} + x_{H_2O} \quad (4)$$

Donde bC , bH y bO son los átomos de hidrógeno, oxígeno y nitrógeno en la forma simplificada de la molécula de biomasa.

Las constantes de equilibrio de la reacción de formación de metano K_1 y la reacción de desplazamiento de gas K_2 fueron planteadas de acuerdo con ⁽¹⁰⁾

$$K_1 = \frac{x_5}{x_1^2} \quad (5)$$

$$K_2 = \frac{x_1x_3}{x_2x_4} \quad (6)$$

La composición elemental del bagazo en base seca para este estudio fue la siguiente: C = 47.5%, H = 5.9%, O = 40.7%, N = 0.29%, humedad = 20%, Cenizas = 5.6% ⁽¹¹⁾.

El modelo se validó con los resultados experimentales para la gasificación con aire autotérmica descrita en ⁽¹²⁾, la gasificación por plasma con aire ⁽¹³⁾ y para la gasificación por plasma con vapor ⁽¹⁴⁾ (Ver Tabla1). La raíz del error cuadrático de la media (rmse) en la predicción de la composición porcentual del syngas fue inferior a 3.5 y en la predicción del poder calorífico del syngas inferior a 0.85 MJ/m³.

Tabla 1. Comparación de los resultados del modelo con los resultados experimentales de otros autores

Criterio	Ref. ⁽¹²⁾	Ref. ⁽¹³⁾	Ref. ⁽¹⁴⁾
rmse composición	2.80	3.48	1.08
Rmse PCI MJ/m ³ *	0.39	0.45	0.84

* A presión y temperatura estándar

La conversión de carbono en un gasificador real depende de muchos factores: termodinámica, cinética química, hidrodinámica, transferencia de calor y masa, tiempo de residencia e incluso distribución del tamaño de partícula, en esta investigación se asume un valor de conversión del carbono del 100%.

Existen varios criterios para la evaluación del desempeño de un gasificador. Según el uso del syngas, algunos son más relevantes que otros. Para la producción energética, los más relevantes son el poder calorífico inferior del gas producido (PCI), la eficiencia del gas frío (CGE), y la producción específica del syngas.

El poder calorífico del syngas da la medida de la cantidad total de calor liberado en la combustión completa de una masa o volumen unitario sin contar la parte correspondiente al calor latente del vapor de agua generado en la combustión. Para su cálculo se utiliza la expresión 7 siguiente:

$$PCI_g = 0.108 \cdot X_{H_2} + 0.126 \cdot X_{CO} + 0.358 \cdot X_{CH_4} \quad [MJ/m^3] \quad (7)$$

Uno de los indicadores de eficiencia más utilizados es la eficiencia del gas frío, que mide la eficiencia energética del proceso de gasificación considerando el gas producido a temperatura ambiente y su ecuación para la gasificación por plasma es tomada de ⁽¹⁵⁾ y expresada en términos de un mol de biomasa. Ver ecuación 8 siguiente:

$$CGE = \frac{PCI'_g}{PCI'_{Biomasa} + Q_{plasma}} \cdot 100 \quad (8)$$

Donde PCI'_g es el poder calorífico inferior del syngas producido al convertir un mol de biomasa, $PCI'_{Biomasa}$ es el poder calorífico inferior de un mol de biomasa.

La producción específica de syngas se puede calcular aproximadamente suponiendo un valor de 22.4 como el volumen de un mol de gas ideal en dm^3 a la temperatura y presión estándar (Ver ecuación 9)

$$y = 22.4 \cdot x_{total} / (12 \cdot bC + bH + 16 \cdot bO + 14 \cdot bN + 18 \cdot w + Am) \quad [dm^3/kg] \quad (9)$$

Donde x_{total} es la cantidad total de moles del gas producido y Am es el contenido de ceniza en un mol de biomasa.

Los datos para analizar el desempeño de la gasificación de bagazo de caña fueron tomados de trabajos de otros autores (Ver Tabla 2). En ellos se puede observar valores de PCI inferiores a $6 MJ/m^3$ y CGE inferiores a 75 % para la gasificación autotérmica de bagazo. Mientras que en la gasificación por plasma la CGE se encuentra entre 80-85%.

Tabla 2. Desempeño de la gasificación de bagazo de caña

Tipo de proceso	Ref. ⁽¹⁶⁾	Ref. ⁽¹⁷⁾	Ref. ⁽¹⁸⁾	
	Autotérmico	Autotérmico	Por Plasma (T=1227°C)	
Agente Gasf.	Aire	Aire+vapor	Aire	Aire+vapor
CGE	73	68	80	85
PCI(MJ/m ³)	5.98	5.23	n.a.	n.a.

Resultados y discusión

Para poder estudiar las áreas efectivas de operación de la gasificación por plasma de biomasa, se consultaron resultados experimentales presentes en la literatura, lo que permitió definir los valores aproximados de los parámetros operacionales fundamentales: relación equivalente (definida por ecuación 10) y la relación de energía del plasma (definida por la ecuación 11) así como la temperatura de reacción (Ver tabla 3).

$$ER = \frac{\text{cantidad de oxígeno real}}{\text{Cantidad de oxígeno teórico para combustión completa}} \quad (10)$$

$$PER = E_{th,plasma} / PCI_{Biomasa} \quad (11)$$

Tabla 3. Parámetros operacionales para la gasificación por plasma

Temperatura de reacción °C	ER	PER
920-1220 ⁽¹⁹⁾	0.04-0.18 ⁽²⁰⁾	0.08-0.11 ⁽²⁰⁾
1122-1281 ⁽³⁾	0.20-0.25 ⁽¹⁹⁾	0-0.20 ⁽¹⁹⁾
	0.43-0.52 ⁽³⁾	

En este estudio se propone utilizar un método gráfico de análisis usando isolíneas, pues estas permiten en una misma figura estudiar la influencia de las variables independientes sobre un conjunto de diversos indicadores de desempeño. La figura 1 muestra el área efectiva de operación entre los 1000 °C y 1300 °C, con un ER superior a 0.05 e inferior a 0.25 donde se ilustran las isolíneas de la temperatura de gasificación, la eficiencia del gas frío, el poder calorífico inferior del syngas y la producción específica de syngas.

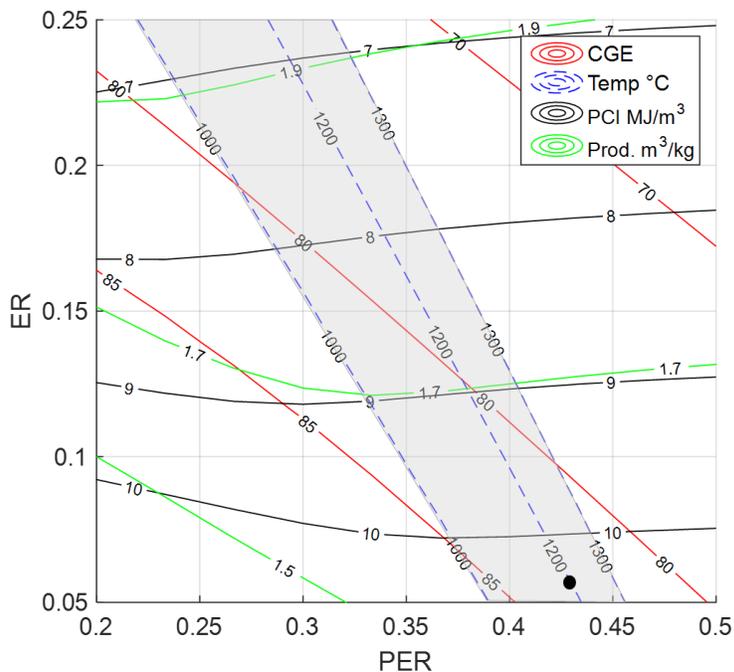


Fig. 1- Desempeño del proceso de gasificación por plasma de bagazo con humedad del 20% y 100% de conversión

El *ER* afecta fuertemente el proceso de gasificación; este determina la temperatura del sistema, la disponibilidad de oxígeno, la producción de syngas, y por tanto la composición del syngas y su poder calorífico. Un aumento de *ER* conlleva a una mayor producción específica de syngas y al mismo a una mayor oxidación que implica mayor producción de dióxido de carbono, a esto se le adiciona el efecto diluyente del nitrógeno incorporado por lo que se reduce el *PCI* del syngas y por tanto disminuye también la eficiencia del gas frío.

EL *PER* es un parámetro característico de la gasificación por plasma con una débil influencia en el *PCI* del syngas, en el área efectiva de operación las isolíneas del *PCI* son casi paralelas al eje del *PER*. Su mayor influencia se aprecia sobre la eficiencia del gas frío, pues un aumento del *PER* implica una disminución de la eficiencia.

La temperatura también tiene un gran impacto en la termoconversión, pues modifica la composición de las especies químicas producidas en el proceso. En la práctica, la temperatura es un parámetro operacional destacado a escala de

laboratorio, pero en las plantas es muy difícil de controlar y de medir con exactitud pues depende de ER , de PER , de los flujos de agente gasificante, del flujo de biomasa y de pérdidas térmicas. Es por ello que en este trabajo más bien es considerada una restricción siendo las variables manipuladas el PER y el ER .

Si se sigue la isolínea de los 1200 °C, correspondiente a un valor típico para este tipo de gasificador, se puede mover el punto de operación aumentando el PER al mismo tiempo que se disminuye el ER o viceversa. Sobre esta línea, en la figura 1, se resalta un punto negro correspondiente a una operación donde el PCI del syngas es superior a 10 MJ/m³ a presión y temperaturas estándares y donde la CGE alcanza un valor de 82%. Este resultado de CGE está en concordancia con lo publicado por ⁽¹⁶⁾ (Ver tabla 2). Además de que evidencian la superioridad de la gasificación por plasma comparada con la gasificación autotérmica en cuanto a poder calorífico del syngas y eficiencia del gas frío.

Para realizar el análisis termodinámico de la integración de la gasificación por plasma a un ciclo combinado con eficiencia η_{ciclo} se asumió el enfoque de ⁽¹³⁾ representado en la figura 2.

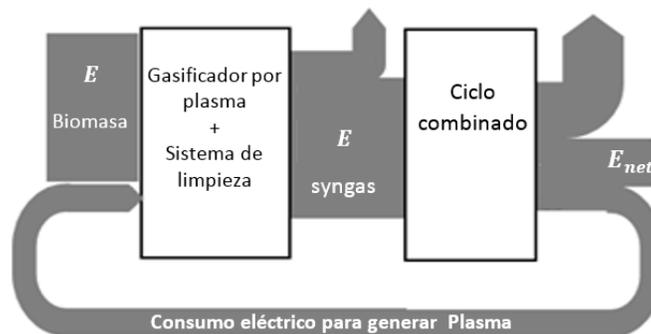


Fig. 2- Flujo de Energía en sistema integrado de gasificador por plasma y ciclo combinado

Mediante la ecuación 12 se puede calcular la energía eléctrica producida para cada kilogramo de biomasa gasificada:

$$E_{net} = m_{gas} \cdot PCI_g \cdot \eta_{ciclo} - E_{plasma} \quad (12)$$

Donde E_{plasma} es la energía eléctrica consumida por las antorchas de plasma para convertir un kilogramo de biomasa.

$$E_{plasma} = Q_{plasma}/\eta_{antorcha} \quad (13)$$

$$Q_{plasma} = PER \cdot PCI_{Biomasa} \quad (14)$$

Sustituyendo las ecuaciones 9 y 10 en 8 queda:

$$E_{net} = m_{gas} \cdot PCI_g \cdot \eta_{ciclo} - PER \cdot PCI_{Biomasa}/\eta_{antorcha} \quad (15)$$

De la ecuación 15 se deduce que si se desea elevar la producción eléctrica debe aumentarse el primer sumando y disminuir el segundo, pero el primer sumando depende del PCI_g y este a su vez depende de ER y PER los cuales están interrelacionados pues de ellos depende también la temperatura de gasificación, por lo que optimizar la producción eléctrica no es trivial.

En este trabajo se propone utilizar el método gráfico para encontrar el punto de operación que maximice la producción eléctrica para lo cual se realizó una exploración de toda el área de operación Ver figura 3.

En la figura 3 se muestran los indicadores de desempeño relacionados a la integración a un ciclo combinado de un gasificador por plasma de bagazo de caña con humedad del 20%, es decir la electricidad neta producida y la eficiencia eléctrica. En esta simulación fueron asumidos valores de $\eta_{ciclo} = 0.6$ y de $\eta_{antorcha} = 0.94$ como en ⁽¹³⁾.

La dependencia de la electricidad neta producida de los parámetros operacionales PER y ER puede ser comprobada en la figura 3. Un incremento de PER se corresponde con un mayor consumo en la generación del plasma y por tanto menor electricidad neta producida y un incremento de ER deteriora la calidad del gas y conduce a una menor generación eléctrica. El punto negro representan un punto de operación sobre los 1200° C donde la generación eléctrica es ligeramente superior a los 4 MJ/kg, Como puede apreciarse, este punto de mayor generación no coincide con el de mayor CGE , sino que se desplaza hacia un mayor ER donde PER es menor.

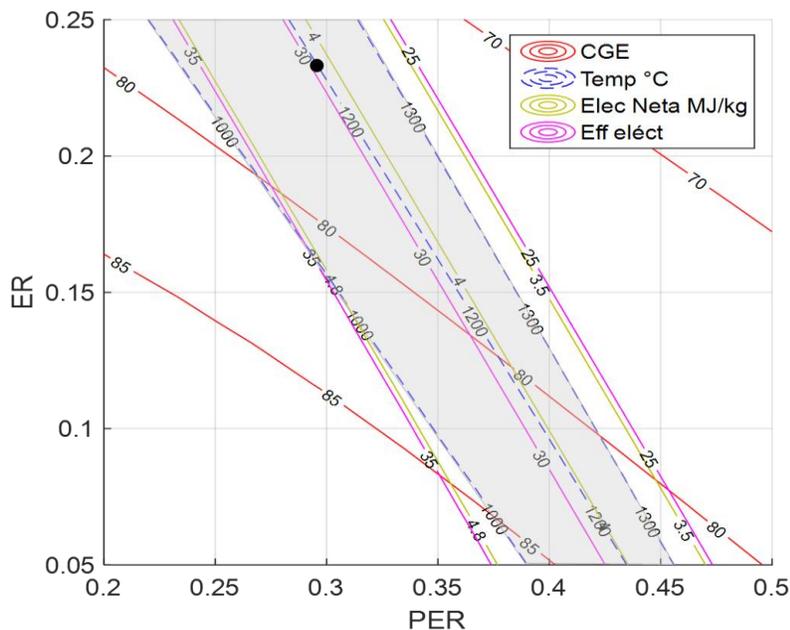


Fig.3- Desempeño de la integración a un ciclo combinado con eficiencia del ciclo de 60%.

La eficiencia eléctrica neta para el sistema estudiado alcanza el 30%, lo que sin duda es mayor que la eficiencia eléctrica alcanzada en plantas donde se quema el bagazo en ciclos Rankine con un 20% de eficiencia eléctrica. ⁽¹⁷⁾

Conclusiones

El proceso de gasificación por plasma puede ser modelado mediante un enfoque de equilibrio termoquímico con un buen grado de aproximación a los resultados reales estudiados, inferior a 3.5% en la predicción de la composición porcentual del syngas.

La *CGE* para la gasificación por plasma del bagazo de caña de azúcar (82 %) es mayor que la *CGE* autotérmica reportada estudiada (68 %, 73 %). De igual forma el *PCI* del syngas para la gasificación por plasma del bagazo de caña de azúcar

(10 MJ/m³) es mayor que el *PCI* de la gasificación autotérmica reportada estudiada (5.98 MJ/m³, 5.23 MJ/m³)

Para cada aplicación del gas producido, *ER* y *PER* deben ajustarse para lograr un rendimiento óptimo. Las zonas donde se maximizan la *CGE* y la electricidad neta producida no son coincidentes, esta última se encuentra desplazada hacia una menor *PER* y una mayor *ER* con respecto a la primera. Alcanzándose una electricidad neta producida en la integración a un ciclo combinado de 4 MJ/kg de bagazo con 30% de eficiencia eléctrica.

Según la literatura científica revisada, aunque la electricidad neta obtenida en la gasificación por plasma es más baja que la autotérmica teórica, esta es una opción viable para aumentar la producción eléctrica en el sector azucarero, pues es un método flexible, con facilidades para el control del proceso y que produce un syngas con bajo contenido de alquitranes adecuado para su integración a ciclos combinados.

Agradecimientos

Los autores agradecen, por su ayuda a financiar esta investigación, al proyecto Capacity Building for Renewable Energy Planning in Cuban Higher Education Institutions (CRECE), al proyecto Cuban energy transformation: Integration of renewable intermittent sources in the power system (IRIS) y al proyecto CAPES-Brazil/MES-Cuba (Project 138/11).

Referencias bibliográficas

1. DAHLQUIST E. *Technologies for converting biomass to useful energy: combustion, gasification, pyrolysis, torrefaction and fermentation*. CRC Press: 2013, ISBN: 0415620880.

2. DESHMUKH R, JACOBSON A, CHAMBERLIN C, DAN K. Thermal gasification or direct combustion? Comparison of advanced cogeneration systems in the sugarcane industry, *Biomass and bioenergy*, 2013, **55**, 163-174, DOI:doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.01.033.
3. AGON N, y otros. Plasma gasification of refuse derived fuel in a single-stage system using different gasifying agents, *Waste Management*. 2016, **47**, 246–255,
4. MESSERLE V E, USTIMENKO A B, LAVRICH SHEV O A. Comparative study of coal plasma gasification: Simulation and experiment, *Fuel*, 2016, **164**, 172-179, DOI:10.1016/j.fuel.2015.09.095.
5. HRABOVSKY, Milan. Thermal plasma gasification of biomass. En: *Progress in Biomass and Bioenergy Production*. InTech, 2011.
6. FABRY F, y otros. Waste Gasification by Thermal Plasma A Review, *Waste and Biomass Valorization*, 2013, **4**, 421–439, DOI:10.1007/s12649-013-9201-7
7. SIKARWAR V S, y otros. An overview of advances in biomass gasification, *Energy Environ Sci*, 2016, 2939-2977, DOI:10.1039/C6EE00935B
8. MIKULANDRIĆ R, y otros. Biomass gasification process modelling approaches. En: *8th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems–SDEWES Conference*; 2013. p. 1-13.
9. MOUNTOURIS A, VOUTSAS E, TASSIOS D. Solid waste plasma gasification: Equilibrium model development and exergy analysis, *Energy Conversion and Management*, 2006, **47**, 1723-1737, DOI:10.1016/j.enconman.2005.10.015
10. ZAINAL Z, y otros. Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials, *Energy Conversion and Management*, 2001, **42**, (12), 1499-1515, ISSN:0196-8904,
11. MAVUKWANA A, y otros. Simulation of sugarcane bagasse gasification using aspen plus. En: *International Conference on Chemical and Environmental Engineering (ICCEE)*, Johannesburg, South Africa; 2013. p. 70-74.
12. JAYAH T H, y otros. Computer simulation of a downdraft wood gasifier for tea drying, *Biomass and bioenergy*, 2003, **25**, (4), 459-469, ISSN:0961-9534, DOI:10.1016/S0961-9534(03)00037-0

13. RUTBERG P G, y otros. On efficiency of plasma gasification of wood residues, *Biomass and bioenergy*, 2011, **35**, (1), 495-504, ISSN:0961-9534,
14. GEORGIEV I B, MIHAILOV B I. Some general conclusions from the results of studies on solid fuel steam plasma gasification, *Fuel*, 1992, **71**, (8), 895-901, ISSN:0016-2361, DOI:10.1016/0016-2361(92)90239-K
15. ZHANG Q, y otros. A thermodynamic analysis of solid waste gasification in the Plasma Gasification Melting process, *Applied Energy*, 2013, **112**, 405-413, ISSN:0306-2619, DOI:10.1016/j.apenergy.2013.03.054
16. SOUZA-SANTOS M D. A feasibility study of an alternative power generation system based on biomass gasification/gas turbine concept, *Fuel*, 1999, **78**, (5), 529-538, ISSN:0016-2361, DOI:10.1016/S0016-2361(98)00181-1
17. PELLEGRIN L F, OLIVEIRA S D. Exergy analysis of sugarcane bagasse gasification, *Energy*, 2007, **32**, (4), 314-327, ISSN:0360-5442, DOI:10.1016/j.energy.2006.07.028
18. MOURÃO R, y otros. Thermochemical Assessment of Gasification Process Efficiency of Biofuels Industry Waste With Different Plasma Oxidants, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, **43**, 3760-3767, DOI:10.1109/TPS.2015.2416129
19. RUTBERG P G, y otros. On efficiency of plasma gasification of wood residues, *Biomass and bioenergy*, 2011, **35**, 10, DOI:10.1016/j.biombioe.2010.09.010
20. DOR Q Z L, y otros. Modeling of steam plasma gasification for municipal solid waste, *Fuel Process Technol*, 2013, **106**, 9,
21. STANMORE B. Generation of Energy from Sugarcane Bagasse by Thermal Treatment, *Waste and Biomass Valorization*, 2010, **1**, 77-89, DOI:10.1007/s12649-009-9000-3

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.