



USO DE LA ENERGÍA EN LA AGRICULTURA *USE OF THE ENERGY IN AGRICULTURE*



<https://eqrcode.co/a/ECxFRX>

ORIGINAL ARTICLE | ARTÍCULO ORIGINAL

Hydrogen-Rich Syngas Production by Plasma Gasification of Existing Biomasses in Cuba

Producción de syngas rico en hidrógeno mediante gasificación por plasma de biomásas existentes en Cuba

MSc. Jorge Jadid Tamayo-Pacheco^I, MSc. Leonardo Peña-Pupo^{II}, Dr.C. Arelys Vázquez-Peña^{III},
Dr.C. Ángel Luis Brito-Sauvanell^{IV}

^I Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Santiago de Cuba, Cuba.

^{II} Empresa de Hidroenergía UEB Santiago de Cuba, Cuba.

^{III} Instituto de Ciencia Animal, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

^{IV} Universidad de Oriente, Centro de Estudios de Energía y Refrigeración Facultad de ingeniería Mecánica, Santiago de Cuba, Cuba.

ABSTRACT. The production of 2nd generation biofuels is a transcendental issue for sustainability due to its influence on reducing fossil fuel consumption. One of the most recognized techniques for the production of biofuels starts from syngas with an $H_2/CO = 2$ molar ratio. This gas can be obtained through the biomass gasification process, a complex process with several operational parameters. The purpose of this study was to perform the simulation of the plasma gasification process of three biomasses that are abundant agro-industrial or forest residues in Cuba. For this, the graphic method and the exploration of the operating regions were used applying a model with a thermochemical equilibrium approach. As a result, it was obtained that it is possible to achieve a production of syngas with values between 1.79-2.80, 1.68-2.37 and 2.09-2.81 NM^3/kg from sugarcane bagasse, rice husk and wood sawdust, respectively, with the cold gas efficiencies, in that same order, 31-65%, 20-49%, and 43-53%. In addition, the sensitivity analysis was carried out to identify the influential parameters on performance indicators.

Keywords: Simulation of plasma gasification, thermodynamic analysis, sensitivity analysis

RESUMEN. La producción de biocombustibles de 2da generación es una cuestión transcendental para la sostenibilidad debido a su contribución a la reducción del consumo de combustibles fósiles. Una de las técnicas más reconocidas para la producción de los biocombustibles comienza a partir de un syngas con una relación molar $H_2/CO=2$. Dicho gas puede ser obtenido mediante el proceso de gasificación de biomasa, un proceso complejo en el que se interrelacionan varios parámetros operacionales. El propósito de este estudio consistió en realizar la simulación del proceso de gasificación por plasma de tres biomásas que constituyen residuos agroindustriales o forestales abundantes en Cuba. Para ello se empleó el método gráfico y la exploración de las regiones de operación utilizando un modelo con enfoque de equilibrio termoquímico. Como resultado se obtuvo que es posible obtener una producción de syngas con valores entre 1,79-2,80, 1,68-2,37 y 2,09-2,81 NM^3/kg a partir de bagazo de caña, cascarilla de arroz y aserrín de madera respectivamente, siendo las eficiencias del gas frío, en ese mismo orden, de 31-65%, 20-49%, y 43-53%. Además, el análisis de sensibilidad permitió establecer los parámetros más influyentes sobre los indicadores de desempeño.

Palabras clave: análisis de sensibilidad, biocombustible, equilibrio termoquímico, residuos agroindustriales y forestales.

^I Author for correspondence: Jorge Jadid Tamayo-Pacheco, e-mail: jadid@uo.edu.cu

Received: 12/12/2019.

Approved: 25/09/2020.

INTRODUCTION

Second-generation biofuels are those obtained from lignocellulose agricultural, industrial forest or municipal residues, as well as non-food energy crops. These biofuels do not compete with food production and are considered a sustainable and environmentally friendly option for the replacement of fossil fuels. The production of energy from biomass at the local or national level contributes to energy sovereignty and security while positively influencing the development of rural areas (Sikarwar *et al.*, 2017).

For the synthesis of second-generation liquid biofuels, one of the methods developed is thermochemistry. Through this method, biomass is converted into a hydrogen-rich gas that is subsequently used as a raw material for the synthesis of liquid fuels (Sikarwar *et al.*, 2017).

The adequate H_2/CO molar ratio is a requirement according to the subsequent use to be made of syngas, for example, an H_2/CO molar ratio of approximately 1.0 is required for the production of aldehyde and alcohol, while it is required an H_2/CO ratio close to 2.0 for the synthesis of biofuels and methanol according to the Fischer-Tropsch method (Im-orb *et al.*, 2016).

The present study is focused on evaluating one of the thermochemical methods with the possibility of producing a gas rich in hydrogen: the gasification of biomass using thermal plasma with air and steam as gasifying agents. This method is considered by some authors as an attractive and ecological option for waste treatment (Favas *et al.*, 2017).

In plasma gasification, with the high temperatures reached, the organic portion of the biomass is decomposed into its constituent elements, leaving also a partially inorganic vitrified slag (Favas *et al.*, 2017). The advantages are the controllability of the process temperature, higher process speeds, lower reactor volume and, especially, an optimal composition of the gas produced where the amount of tars is insignificant. Also, inorganic materials are recovered for their use in (Hrabovsky *et al.*, 2017). However, it has some notable drawbacks, such as high electricity consumption, the need for resistant materials given the high operating temperature and high investment costs. (Favas, *et al.*, 2017; Sikarwar, *et al.*, 2017). On the other hand, this process can be understood as a store of electrical energy since it is, in a certain way, stored in the gas produced (Hrabovsky *et al.*, 2017).

Although there are currently waste treatment plants, mainly for urban solid and dangerous waste, that operate with the plasma gasification method, it is a technology whose maturity is debatable (Li *et al.*, 2016). The introduction of this technology implies challenges that begin with the knowledge of it through studies and technical-economic evaluations, for which the use of simulations is necessary.

Numerous studies have addressed the issue of the production of hydrogen-rich gas from biomass gasification, both from a theoretical and an experimental point of view (Parthasarathy and Narayanan, 2014). But most of these studies are aimed at thermo-conversion by other methods such as rapid pyrolysis followed by steam reforming of coal, supercritical water

INTRODUCCIÓN

Los biocombustibles de segunda generación son aquellos obtenidos a partir de residuos lignocelulosos agrícolas, forestales industriales o municipales, así como de cultivos energéticos no alimentarios. Estos biocombustibles no compiten con la producción de alimentos y son considerados una opción sostenible y ambientalmente amigable para la sustitución de combustibles fósiles. La producción de energía a partir de la biomasa a nivel local o nacional contribuye a la soberanía y seguridad energéticas al mismo tiempo que influye positivamente en el desarrollo de las zonas rurales (Sikarwar *et al.*, 2017).

Para la síntesis de biocombustibles líquidos de segunda generación uno de los métodos desarrollados es el termoquímico. Mediante este método la biomasa es convertida en un gas rico en hidrógeno que posteriormente es utilizado como materia prima para la síntesis de combustibles líquidos (Sikarwar *et al.*, 2017).

La adecuada relación molar H_2/CO es un requisito exigido según el posterior uso que se le va a dar al syngas por ejemplo, se requiere una relación molar H_2/CO de aproximadamente 1.0 para la producción de aldehído y alcohol, mientras que se requiere una relación H_2/CO cercana a 2,0 para la síntesis de biocombustibles y metanol según el método Fischer-Tropsch (Im-orb *et al.*, 2016).

El presente estudio está enfocado a evaluar uno de los métodos termoquímicos con posibilidades de producir un gas rico en hidrógeno: la gasificación de biomasa utilizando plasma térmico con mezcla de aire y vapor como agentes gasificantes. Este método es considerado por algunos autores como una opción atractiva y ecológica para el tratamiento de residuos (Favas *et al.*, 2017).

En la gasificación por plasma, con las altas temperaturas que se alcanzan, se descompone la porción orgánica de la biomasa en sus elementos constituyentes quedando además una escoria vitrificada parcialmente inorgánica (Favas, *et al.*, 2017). Como ventajas se citan la controlabilidad de la temperatura del proceso, mayor velocidades de proceso, menor volumen de los reactores y especialmente una composición óptima del gas producido donde la cantidad de alquitranes es insignificante, también los materiales inorgánicos se recuperan para aplicarlos en la construcción (Hrabovsky *et al.*, 2017). Sin embargo, presenta algunos inconvenientes notables, como el elevado consumo de electricidad, la necesidad de materiales resistentes dada la alta temperatura de funcionamiento y los altos costos de inversión (Favas, *et al.*, 2017; Sikarwar, *et al.*, 2017). Por otro lado, este proceso puede ser entendido como un almacenador de energía eléctrica ya que esta es, de cierta forma, almacenada en el gas producido (Hrabovsky, *et al.*, 2017).

Aunque actualmente existen plantas de tratamiento de residuos, fundamentalmente residuos sólidos urbanos, que operan con el método de gasificación por plasma es una tecnología cuya madurez es discutible (Li *et al.*, 2016). La introducción de esta tecnología implica desafíos que comienzan con el conocimiento de la misma mediante estudios y evaluaciones técnicas- económicas, para lo cual es necesario el uso de simulaciones.

Numerosos estudios han abordado la temática de la producción de gas rico en hidrógeno a partir de la gasificación de biomasa tanto desde el punto de vista teórico como experimental (Parthasarathy and Narayanan, 2014). Pero la mayor parte de estos estudios están orientados a la termoconversión mediante

gasification, and steam gasification but do not include plasma gasification (Parthasarathy and Narayanan, 2014).

Some of the more recent works on plasma gasification to obtain hydrogen describe experimental results on a laboratory or pilot plant scale (Diaz *et al.*, 2015; Hlina *et al.*, 2014; Hrabovsky, *et al.*, 2017; Shie *et al.*, 2014; Tamošiūnas *et al.*, 2016; Yoon and Lee, 2012) pilotos (Diaz *et al.*, 2015; Hlina *et al.*, 2014; Hrabovsky, *et al.*, 2017; Shie *et al.*, 2014; Tamošiūnas *et al.*, 2016; Yoon and Lee, 2012); others include simulation from models (Diaz, *et al.*, 2015; Favas, *et al.*, 2017; Hrabovsky, *et al.*, 2017; Ismail *et al.*, 2019; Tamošiūnas, *et al.*, 2016; Tavares *et al.*, 2019). Some use only the composition of syngas as performance criteria and do not address energy efficiency issues such as Favas *et al.* (2017); Tavares *et al.* (2019) or as in the case of Shie, *et al.* (2014), which simply describe the results of other authors where the feasibility of such technology is confirmed. Other works also include energy efficiency as a performance indicator Hrabovsky *et al.* (2017); Ismail *et al.* (2019); Yoon and Lee (2012). Tamošiūnas *et al.* (2016) consider the carbon conversion, the specific energy required for the amount of syngas produced and the energy efficiency of the process, but do not include the energy consumed to generate the added water vapor.

The objective of this work is to evaluate the results of the plasma gasification of three biomasses present in Cuba, having as operational parameters the steam-biomass ratio (SBR), the equivalence ratio (ER) and the energy ratio between the enthalpy of plasma and the calorific value of biomass (PER). To do this, performance issues such as the composition of syngas and energy issues such as the cold gas efficiency (CGE) and the specific energy consumed per kg of hydrogen produced, among others, are assumed as performance indicators. This analysis is more comprehensive compared with the previously cited works. The approach used is novel because the joint effect of the parameters in the selected operating regions is analyzed, which constitute process restrictions. The study uses the graphic method and the exploration of the operating regions by means of a model with a thermochemical equilibrium approach. Finally, a sensitivity analysis of the model allows establishing the most influential parameters on the H_2/CO ratio, the calorific value, the efficiency and the specific production of the syngas.

METHODS

To simulate the process, in this study, a thermochemical equilibrium model was used. This type of model is very popular because it is relatively simple and the results to be obtained are close to reality, mainly in gasifiers that operate at high temperatures and with sufficient residence time in which the operational state is close to theoretical equilibrium. This type of model has previously been used to describe the plasma gasification process (Diaz *et al.*, 2015; Mountouris *et al.*, 2006).

The model inputs include: the elemental composition of the biomass, its humidity and ash quantity, the amount of air that reacts, the amount of added steam, the enthalpy contributed to

otros métodos como son la pirolisis rápida seguida de reformado con vapor del carbón, la gasificación en agua supercrítica y la gasificación con vapor y no incluye la gasificación por plasma (Parthasarathy and Narayanan, 2014).

Algunos de los trabajos más recientes sobre gasificación por plasma para obtención de hidrógeno describen resultados experimentales a escala de laboratorio o plantas pilotos (Diaz *et al.*, 2015; Hlina *et al.*, 2014; Hrabovsky, *et al.*, 2017; Shie *et al.*, 2014; Tamošiūnas *et al.*, 2016; Yoon and Lee, 2012); otros incluyen la simulación a partir de modelos (Diaz, *et al.*, 2015; Favas, *et al.*, 2017; Hrabovsky, *et al.*, 2017; Ismail *et al.*, 2019; Tamošiūnas, *et al.*, 2016; Tavares *et al.*, 2019). Algunos toman como criterio de desempeño solamente la composición del syngas y no abordan cuestiones de eficiencia energética como Favas, *et al.* (2017; Tavares *et al.* (2019) o como en Shie, *et al.* (2014) que en cuanto a la eficiencia se limita a describir resultados de otros autores donde se confirma la factibilidad de dicha tecnología. Otros que si incluyen la eficiencia energética como indicador de desempeño son Hrabovsky *et al.* (2017); Ismail *et al.* (2019); Yoon and Lee (2012). En Tamošiūnas *et al.* (2016) se consideró la conversión del carbono, la energía específica requerida por cantidad de syngas producido, y la eficiencia energética del proceso en la que no se incluyó la energía consumida para generar el vapor de agua adicionado.

EL objetivo de este trabajo es evaluar los resultados de la gasificación por plasma de tres biomazas presentes en Cuba, teniendo como parámetros operacionales la relación vapor-biomasa (SBR), la relación de equivalencia (ER) y la relación energética entre la entalpía del plasma y el poder calorífico de la biomasa (PER) asumiendo como indicadores de desempeño cuestiones relativas a la composición del syngas y cuestiones energéticas como son la eficiencia del gas frío (EGF) y la energía específica consumida por kg de hidrógeno producido, entre otras. Esto le da un carácter más integral con respecto a los trabajos anteriormente citados. El enfoque utilizado es novedoso en tanto que se analiza el efecto conjunto de los parámetros en las regiones de operación seleccionadas las cuales constituyen restricciones del proceso. En el estudio se emplea el método gráfico y la exploración de las regiones de operación utilizando un modelo del proceso con enfoque de equilibrio termoquímico Por último un análisis de sensibilidad del modelo permite establecer los parámetros más influyentes sobre la relación H_2/CO , el poder calorífico del syngas, la eficiencia y la producción específica del syngas.

MÉTODOS

Para realizar los cálculos se utilizó un modelo de equilibrio termoquímico. Este tipo de modelo tiene 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. Este tipo de modelo ha sido utilizado anteriormente para describir el proceso de gasificación por plasma (Diaz *et al.*, 2015; Mountouris *et al.*, 2006).

Como entradas del modelo se incluyen: la composición elemental de la biomasa, su humedad y cantidad de cenizas, la cantidad de aire que reacciona, la cantidad de vapor adicionada, la entalpía aportada a la reacción por el plasma térmico, y la relación del carbón no convertido. La composición final

the reaction by the thermal plasma and the carbon ratio unconverted. The final composition of the syngas is the main output of the model and constitutes a basic element to later calculate the energy performance criteria. The energy of the thermal plasma was taken into account in the energy balance as in Mountouris *et al.* (2006) and it is shown in Equation 1.

$$\begin{aligned} \Delta H_{f_{biomasa}}^{\circ} + w(\Delta H_{f_{H_2O}}^{\circ} + H_{(vap)}) + m\Delta T_{air}(Cp_{mO_2} + 3.76Cp_{mN_2}) \\ + s(\Delta H_{f_{H_2O(vap)}}^{\circ} + \Delta T_{steam}Cp_{mH_2O}) + Q_{Plasma}(100 - Losses)/100 \\ = x_{CO}\Delta H_{f_{CO}}^{\circ} + x_{CO_2}\Delta H_{f_{CO_2}}^{\circ} + x_{H_2O}\Delta H_{f_{H_2O}}^{\circ} + x_{CH_4}\Delta H_{f_{CH_4}}^{\circ} \\ + \Delta T(x_{H_2}Cp_{mH_2} + x_{CO}Cp_{mCO} + x_{CO_2}Cp_{mCO_2} + x_{H_2O}Cp_{mH_2O} + x_{CH_4}Cp_{mCH_4} \\ + (3.76m + bN)Cp_{N_2}) + ncC \cdot Cp_{mC} \end{aligned} \quad (1)$$

Where:

- $\Delta H_{f_i}^{\circ}$ - enthalpy of formation of substance *i* [kJ/kmol]
- amount of water contained in the biomass [mol]
- s- amount of water vapor added [mol]
- m- amount of air involved in the reaction [mol]
- enthalpy provided by the thermal plasm [kJ]
- amount of substance present in the products [mol]
- average specific heat of the [kJ/(kmol·K)]
- ΔT - temperature difference between the gasification temperature and 298 K° [K°]
- unconverted carbon fraction [mol]
- enthalpy of water vaporization [kJ/kmol]
- ΔT_{air} - air temperature minus 298 K
- ΔT_{steam} - water vapor temperature minus 298 K
- ΔT - gasification temperature minus 298K
- energy losses as % de

Other equations that are part of the model are the mass balance of carbon, hydrogen, oxygen and nitrogen as in Zainal *et al.* (2001)

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

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

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

$$bN + 3.76 \cdot 2m = 2x_{N_2} \quad (5)$$

Where , , and are the carbon, hydrogen, oxygen and nitrogen atoms in the simplified form of the biomass molecule, respectively.

The equilibrium constants of the methane formation reaction and the gas displacement reaction were written in correspondence with (Zainal, *et al.*, 2001):

$$K_1 = \frac{x_{CH_4}}{x_{H_2}^2} \quad (6)$$

The relationships between the operational parameters and the model inputs are:

$$\cdot(7)$$

$$= \cdot/18 \quad (8)$$

del syngas es la principal salida del modelo y constituye un elemento básico para luego calcular los criterios de desempeño energéticos.

La energía del plasma térmico se tuvo en cuenta en el balance de energía como en (Mountouris *et al.*, 2006) y se muestra en la ecuación 1.

Donde:

- $\Delta H_{f_i}^{\circ}$ - es la entalpía de formación de la sustancia *i* [kJ/kmol]
- w-cantidad de agua contenida en la biomasa [mol]
- s- cantidad de vapor de agua adicionado [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]
- ΔT_{air} - Temperatura del aire menos 298 K
- ΔT_{vapor} - Temperatura del vapor de agua menos 298 K
- ΔT - Temperatura de gasificación menos 298 K
- Perd- Pérdidas energéticas en % de

Otras ecuaciones en el modelo son el balance de masa de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno como en (Zainal *et al.*, 2001)

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

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

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

$$bN + 3.76 \cdot 2m = 2x_{N_2} \quad (5)$$

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

Las constantes de equilibrio de la reacción de formación de metano y la reacción de desplazamiento de gas fueron planteadas en correspondencia con (Zainal, *et al.*, 2001):

$$K_1 = \frac{x_{CH_4}}{x_{H_2}^2} \quad (6)$$

Las relaciones entre los parámetros operacionales y las entradas del modelo son:

$$m=ER \cdot a_i \quad (7)$$

$$s=SBR \cdot M_{biomH}/18 \quad (8)$$

(9) Being a_t the theoretical amount of air for complete combustion of one mole of biomass, M_{biomH} the molar mass of the wet biomass and LHV_{biom} the lower heating value of the dry biomass.

The system of equations of the model was solved following an algorithm similar to that proposed in Melgar *et al.* (2007), where the gasification temperature is searched iteratively such that the set of equations is solved (2) to (6) and the energy balance of Equation (1) is met.

For the calculation of the specific heats, empirical expressions taken from Smith (1950); Zainal *et al.* (2001)

The process performance indicators were calculated as:

$$Q_{plasma} = PER \cdot PCI_{biom} \quad (9)$$

Siendo a_t la cantidad de aire teórica para combustión completa de un mol de biomasa, M_{biomH} la masa molar de la biomasa húmeda y PCI_{biom} el poder calorífico de la biomasa seca.

El sistema de ecuaciones del modelo se resolvió siguiendo un algoritmo similar al de Melgar *et al.* (2007), donde iterativamente se va buscando la temperatura de gasificación tal que se resuelve el conjunto de ecuaciones 2 a la 6 y se cumple con el balance energético de la ecuación 1.

Para los cálculos del calor específico se utilizaron expresiones empíricas tomadas de Smith (1950); Zainal *et al.* (2001)

Los indicadores de desempeño se calcularon como sigue:

$$H_2 / CO = x_{H_2} / x_{CO_2} \quad (10)$$

$$CGE = \frac{H_{gas}}{PCI_{biom} + \frac{Q_{plasma}}{\eta_{torch}} + s \cdot H_{steam}} \cdot 100 \quad (11)$$

$$PCI_g = 0.108 \cdot X_{H_2} + 0.126 \cdot X_{CO} + 0.358 \cdot X_{CH_4} \quad [MJ/m^3] \quad (12)$$

$$Electric\ cons.\ per\ kg\ of\ biom. = \frac{Q_{plasma}}{\eta_{torch} \cdot M_{biomH} \cdot 3600} \left[\frac{kWh}{kg\ de\ biom.} \right] \quad (13)$$

$$Electric\ cons.\ per\ kg\ of\ H_2 = \frac{Q_{plasma}}{\eta_{torch} \cdot 2 \cdot x_{H_2} \cdot 3600} \left[\frac{kWh}{kg\ de\ H_2} \right] \quad (14)$$

Where H_{gas} is the energy of the syngas produced by gasifying one mole of biomass calculated as the amount of the substance multiplied for its lower calorific value, H_{vapor} is the molar enthalpy of the water vapor added in kJ/kmol, x_i denotes in percent the composition of the gas.

Three biomasses present in Cuba were selected for the study: sugarcane bagasse, rice husk and wood sawdust. The first two have an agroindustrial origin and the second one, a woody origin. Their characteristics are shown in Table 1. It is noteworthy that these properties change according to the variety and weather conditions, so it is recommended to determine them experimentally for subsequent works. In the case of wood sawdust, a composition generally accepted by other authors was assumed (Zainal *et al.*, 2001):

donde H_{gas} es la energía del syngas producido al gasificar un mol de biomasa calculada como la cantidad de sustancia por su poder calorífico inferior, H_{vapor} es la entalpía molar del vapor de agua adicionado en kJ/kmol, x_i denota en porciento la composición del gas i .

Para el estudio fueron seleccionadas tres biomazas presentes en Cuba, el bagazo de caña, la cascarilla de arroz y el aserrín de madera. Las dos primeras son de origen agroindustrial y la segunda de origen leñoso. Sus características se muestran en la Tabla 1. Es de destacar que estas propiedades cambian según la variedad y condiciones climatológicas por lo que para posteriores trabajos se recomienda determinarlas experimentalmente. En el caso del aserrín de madera se asumió una composición generalmente aceptada por otros autores (Zainal, *et al.*, 2001).

Table 1 Characteristics of the studied biomass
TABLA 1 Características de las biomazas estudiadas

	Elemental Composition (dry basis)				Moisture %	Ash (dry basis)	Reference
	C%	H%	O%	N%			
Bagasse	47.5	5.9	40.7	0.29	20	5.6	(Mavukwana, 2013)
Rice husk	38.4	2.97	36.4	0.49	9.95	21.7	(Loha., 2011)
Sawdust	50	6	44	0	10, 0	0	(Zainal., 2001)

The study carried out consisted of selecting an operation region for two of the operational parameters (PER and SBR).

El estudio realizado consistió en seleccionar una región de operación para dos de los parámetros operacionales (PER y SBR),

In this region, 120 points were explored and in each one the ER was increased, starting from zero until obtaining a value such that the restriction that the gasification temperature is equal to 1200 °C, at which the formation of tars, is negligible (Rutberg *et al.*, 2011). To analyze the results obtained, the graphic method was used by drawing contour lines of the values of interest. The region of operation is limited to the level curve where $H_2/O=2$, it will be called: restricted region of operation. The level curve corresponding to the minimum ER=0 outside was also drawn. On the restricted operation region, the extreme points and an intermediate point were studied, for each one, the performance indicators of gas quality and energy issues were calculated.

For the sensitivity study, the graphic method of tornado diagrams obtained for each of the model inputs was used, considering, for each input, a variation of $\pm 10\%$ of its nominal value. Values higher than nominal were not taken into account for the carbon conversion and for the torch efficiency because they were considered maximums, and the thermal losses in the gasifier were considered non-negative.

RESULTS AND DISCUSSION

Figure 1 shows the level curves of the H_2/CO ratio, the LHV of the syngas and the production of syngas per kilogram of biomass gasified. The restricted operation region, where the extreme points and an intermediate one were marked, is highlighted.

Following the $H_2/CO=2$ curve in the direction of the increase in SBR, it happens that the ER must increase to decrease the positive effect of SBR on H_2/CO , but this causes an increase in temperature and to counteract it, PER must decrease. But PER also affects the composition of gases, an operating point must be achieved such that the effects of the decrease in PER and the increase in ER guarantee that the restrictions are met. Consequently, the LHV of the syngas decreases, the specific production increases and the amount of hydrogen produced decreases. The latter is mainly due to the greater presence of oxygen that favors obtaining water in the products. As it can be seen, there is a relationship among the three operational parameters in the restricted operation region, so it is not trivial to determine the joint effect of their variations.

Points A for bagasse and sawdust are close to plasma gasification with steam in the absence of air (ER = 0). For rice husk, an expansion of the area of operation in the direction of the decrease in SBR is still possible (See Figure 1).

The restricted operating region of bagasse is displaced towards lower SBR values compared to that of the other biomasses. The reason for this is that the hydrogen content in this wet biomass is higher than in the others, so the process requires less hydrogen from the steam. The operating points A of rice husk and sawdust are close. However, point B of sawdust is at a higher value of PER, since the latter biomass requires more external heat.

Table 2 summarizes the performance indicators related to the hydrogen production potential for the three biomasses

en dicha región fueron explorados 120 puntos y en cada punto se fue incrementando ER, partiendo desde cero, hasta obtener un valor tal que se cumpla la restricción de que la temperatura de gasificación sea igual a 1200 °C a la cual la formación de alquitranes es despreciable (Rutberg *et al.*, 2011). Para analizar los resultados obtenidos se utilizó el método gráfico mediante el trazado de curvas de nivel de los valores de interés. Quedando limitada la región de operación a la curva de nivel donde $H_2/CO = 2$ que en adelante será llamada: región de operación restringida. También fue trazada la curva de nivel correspondiente al mínimo ER = 0 fuera de la cual el modelo no es válido.

Sobre la región de operación restringida fueron estudiados los puntos extremos y uno intermedio, obteniéndose para cada uno indicadores de desempeño de la calidad del gas y de las cuestiones energéticas.

Para el estudio de sensibilidad se utilizó el método gráfico de diagramas de tornados obtenidos para cada una de las entradas del modelo considerando para cada entrada una variación del $\pm 10\%$ de su valor nominal. Ni para la conversión del carbono, ni para la eficiencia de la antorcha fueron considerados valores superiores a los nominales por considerarse estos máximos, así mismo las pérdidas energéticas en el gasificador se consideraron no negativas.

RESULTADOS Y DISCUSION

En la Figura 1 se pueden apreciar las curvas de nivel de la relación H_2/CO , el PCI del syngas y la producción de syngas por kilogramo de biomasa gasificada. Se destaca la región de operación restringida donde fueron marcados los puntos extremos y uno intermedio.

Siguiendo la curva de $H_2/CO=2$ en el sentido del aumento de SBR ocurre que ER debe aumentar para disminuir el efecto positivo de SBR sobre H_2/CO , pero esto provoca un aumento de la temperatura y para contrarrestarlo PER debe disminuir. Solo que PER también afecta la composición de los gases. Debiéndose lograr un punto de operación tal que los efectos de la disminución de PER y el incremento de ER garanticen se cumplan las restricciones. Tras lo cual el PCI del syngas disminuye, la producción específica aumenta y la cantidad de hidrógeno producido disminuye, esto último debido fundamentalmente a la presencia mayor de oxígeno que favorece cantidad de agua en los productos. Como puede apreciarse, existe una relación entre los tres parámetros operacionales en la región de operación restringida por lo que no resulta trivial determinar el efecto conjunto de las variaciones de los mismos.

Los puntos A para el bagazo y el aserrín se encuentran cercanos a la gasificación por plasma con vapor en ausencia de aire (ER=0). Para la cascara de arroz aún es posible una ampliación del área de operación en el sentido de la disminución del SBR (Figura 1).

La región de operación restringida del bagazo se encuentra desplazada hacia menores valores de SBR comparada con la de las otras biomásas. La causa de esto radica en que el contenido de hidrógeno en esta biomasa húmeda es superior a las otras por lo que el proceso requiere menor cantidad de hidrógeno procedente del vapor. Los puntos de operación A de la cascara de arroz y del aserrín están próximos, sin embargo, el punto B del aserrín está en un valor superior de PER ya que esta última biomasa requiere de mayor calor externo.

at three points in the restricted operation region. Where it can be observed that the maximum hydrogen production per kg of biomass was obtained for the wood sawdust at point A, where ER is closest to zero; while the minimum was for rice husk at point B. In this indicator, wood sawdust outperforms bagasse and rice husk. This is explained by the composition of rice husk, which has the lowest percentage of carbon and hydrogen, in addition to the highest percentage of ash of the three biomasses.

La Tabla 2 resume los indicadores de desempeño relativos al potencial de producción de hidrógeno para las tres biomásas en tres puntos de la región de operación restringida donde la máxima producción de hidrógeno por kg de biomasa se obtuvo para el aserrín de madera en el punto A donde ER es más cercano a cero. Mientras que la mínima fue para la cáscara de arroz en el punto B. En este indicador el aserrín de madera aventaja al bagazo y este a la cáscara de arroz. Esto se explica por la composición de la cáscara de arroz que tiene el menor porcentaje de carbono y de hidrógeno además del mayor porcentaje de cenizas de las tres biomásas.

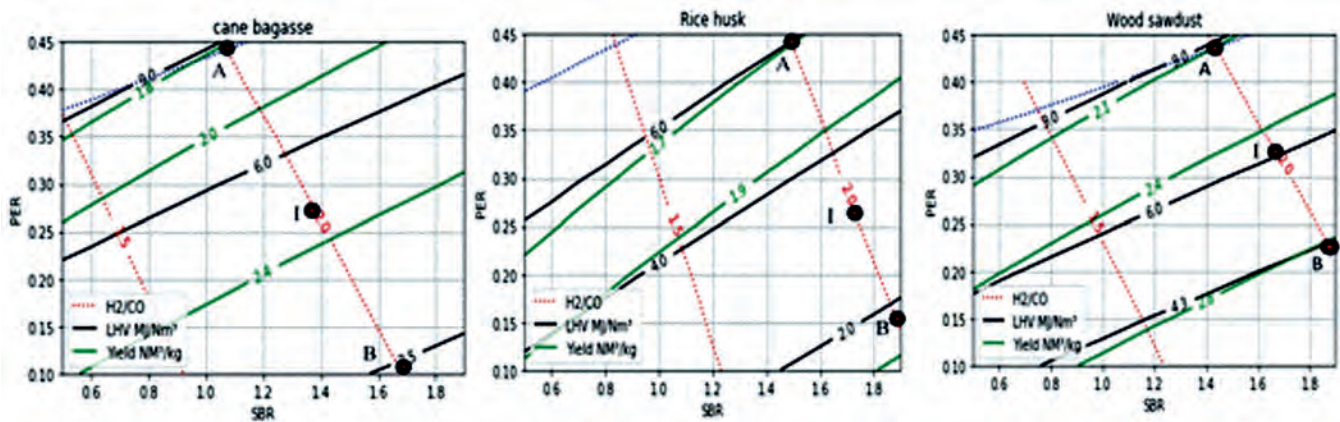


FIGURE 1. Process performance in the operation area. Note: the blue line limits the region where ER > 0
 FIGURA 1. Desempeño del proceso en el área de operación. Nota: la línea azul limita la región donde ER > 0.

The highest production of syngas was obtained at points B of bagasse and sawdust (see Table 2). For bagasse and rice husk there are operating points in which the gas PCI is less than 4 MJ / Nm³, which limits its application for energy purposes. The syngas with the highest hydrogen composition were obtained at points A of bagasse and sawdust and the lowest at point B of rice husk.

El mayor volumen de syngas se produjo en los puntos B del bagazo y del aserrín. En este indicador el aserrín de madera aventaja al bagazo y este a la cáscara de arroz. Para el bagazo y la cáscara de arroz existen puntos de operación para los cuales el PCI del gas es menor que 4 MJ/Nm³ lo cual limita su aplicación con fines energéticos. El syngas con mayor composición de hidrógeno se obtuvo en los puntos A del Bagazo y del aserrín y el menor en el punto B de la cascarilla de arroz.

TABLE 2 Performance indicators of syngas production
 TABLA 2. Indicadores de desempeño de la producción de syngas

	Cane Bagasse			Rice husk			Wood sawdust		
	Pt. A	Pt. I	Pt. B	Pt. A	Pt. I	Pt. B	Pt. A	Pt. I	Pt. B
SBR	1.07	1.39	1.70	1.45	1.75	2.0	1.45	1.63	2.0
PER	0.45	0.27	0.10	0.44	0.28	0.15	0.44	0.34	0.24
ER	0.05	0.34	0.61	0.20	0.45	0.70	0.05	0.22	0.40
m _{H2} /m _{biom} (g/kg)	83	58	34	54	37	20	97	80	61
Prod. (Nm ³ /kg)	1.79	2.31	2.80	1.68	2.02	2.37	2.09	2.45	2.81
LHVg (MJ/Nm ³)	9.01	4.83	2.35	6.14	3.50	1.63	8.94	6.24	4.26
H%	52	28.10	13.76	35.84	20.55	9.64	51.94	36.60	25.11

Table 3 summarizes the performance indicators related to energy efficiency for the three biomasses at three points in the restricted operation region. The highest cold gas efficiency was obtained for bagasse at point A, and the lowest for rice husk at point B. For rice husk, the CGE was less than 50% in the three points, so it would be necessary to extend the region of operation in the sense of decreasing SBR to operate the process with a higher CGE value.

La Tabla 3 resume los indicadores de desempeño relativos a la eficiencia energética para las tres biomásas en tres puntos de la región de operación restringida. La mayor eficiencia del gas frío se obtuvo para el bagazo en el punto A, y la menor para la cáscara de arroz en el punto B. Para la cáscara de arroz la EGF fue inferior al 50% en los tres puntos, por lo que habría que extender la región de operación en el sentido de la disminución de SBR si se quisiese operar el proceso con un mayor valor de EGF.

Interestingly, at points A, the CGE is higher, with those having the highest PER values in the three biomasses. The explanation for this fact is that, at points A, the ER is minimal and the amount of nitrogen in the syngas is notably less. Furthermore, at these points, the amount of H₂ and CO are greater, so the calorific value of syngas is several times higher. At points B, the CGE is diminished because the high ER values favor the water vapor content more than the H₂ content in the syngas. The highest electricity consumption of plasma per kg of biomass corresponds to sawdust at point A and the lowest to point B of bagasse. In the three points the sawdust required a higher electrical consumption per kg of biomass.

The electric consumption per kg of H₂ was higher in rice husk in the three points, while in the lowest of all, it was point B of bagasse. This is an information that can be used in dimensioning plasma torches. In general, at all points, the electrical consumption per kg of H₂ was lower than the average electrical consumption in the hydrolysis process (55 kWh/kg of H₂). This demonstrates how advantageous it could be to produce hydrogen by biomass gasification compared to removing it from water by hydrolysis.

Resulta interesante el hecho de que en los puntos A, la EGF es mayor siendo esos los de mayores valores de PER en las tres biomazas. La explicación de este hecho radica en que en los puntos A se cumple que ER es mínimo y la cantidad de nitrógeno en el syngas es notablemente menor, además la cantidad de H₂ y CO son mayores por lo que el poder calorífico del syngas es varias veces superior. En los puntos B la EGF también se ve disminuida porque los elevados valores de ER favorecen más el contenido de vapor de agua que de H₂ en el syngas.

El mayor consumo eléctrico del plasma por kg de biomasa corresponde al aserrín en el punto A y el menor al punto B del bagazo. En los tres puntos el aserrín requirió un mayor consumo eléctrico por kg de biomasa.

El consumo eléctrico por kg de H₂ fue superior en la cascara de arroz en los tres puntos mientras que en el menor de todos fue el punto B del bagazo. Este es un dato que puede ser utilizado en el dimensionamiento de las antorchas de plasma. De forma general, en todos los puntos, el consumo eléctrico por kg de H₂ fue inferior al consumo eléctrico promedio en el proceso de hidrólisis (55 kWh/kg de H₂), esto demuestra lo ventajoso que pudiera ser producir hidrógeno mediante gasificación de biomasa comparado con extraerlo del agua por hidrólisis.

TABLE 3. Performance indicators of the energy efficiency of the process
TABLA 3. Indicadores de desempeño de la eficiencia energética del proceso

	Cane bagasse			Rice husk			Wood sawdust		
	Pt. A	Pt. I	Pt. B	Pt. A	Pt. I	Pt. B	Pt. A	Pt. I	Pt. B
CGE	65	49	31	49	36	20	63	54	43
Electric cons. (kWh/kg of bio.)	1.95	1.17	0.43	1.48	0.99	0.49	2.23	1.72	1.21
Electric cons. (kWh/kg of prod. H ₂)	24.40	20.18	12.59	27.53	26.52	24.17	23.00	21.50	19.7

In this study, the possibility of taking advantage of the sensible heat of the syngas to produce part of the steam added to the process was not considered; but it is something that must be taken into account in subsequent investigations. Figure 2 shows how superior the sensible heat of the syngas is compared to the latent and sensible heat of the steam involved in the process. The idea of recovering this heat has been raised by some authors Hrabovsky *et al.* (2017) and in ZHU (2015), that this can increase efficiency by up to 5 percentage points.

The sensitivity analysis was performed at the points previously defined as “I” with similar results for the three biomasses. Figure 3 shows the local sensitivity analysis for the point I of bagasse, in addition to PER, ER and SBR. Other variables were incorporated into the study such as biomass humidity, steam temperature, unconverted carbon, thermal losses in the gasifier and torch efficiency.

Figure 3 shows that the LHV of the syngas is strongly affected by the ER and it does it in the opposite way, that is, a greater ER implies a lesser LHV and vice versa. Furthermore, this indicator is significantly affected by the non-conversion of carbon, since it causes less presence of carbon monoxide and methane in the syngas.

The H₂/CO ratio is strongly influenced by SBR directly, while ER and PER do it inversely and to a lesser extent. On this indicator the effect of steam temperature is inverse, but with

En este estudio no se consideró la posibilidad de aprovechar el calor sensible del syngas para producir parte del vapor adicionado al proceso; pero es algo que debe tenerse en cuenta en posteriores estudios. La Figura 2 muestra cuán superior es el calor sensible del syngas comparado con el calor latente y el sensible del vapor que intervienen en el proceso. La idea de recuperar este calor ha sido planteada en Hrabovsky *et al.* (2017) y en ZHU (2015) se asegura que esto puede incrementar la eficiencia hasta en 5 puntos porcentuales.

El análisis de sensibilidad se realizó en los puntos I con resultados similares para las tres biomazas. La Figura 3 muestra el análisis de sensibilidad local para el punto I del bagazo, además de PER, ER y SBR se incorporaron en el estudio otras variables como son: la humedad de la biomasa, la temperatura del vapor, el carbono no convertido, las pérdidas térmicas en el gasificador, y la eficiencia de la antorcha.

Se aprecia que el PCI del syngas es afectado fuertemente por el ER y lo hace en modo inverso, es decir mayor ER implica menor PCI y viceversa. Además, este indicador es afectado fuertemente por la no-conversión del carbono debido a que esta provoca menor presencia de monóxido de carbono y metano en el syngas.

La relación H₂/CO es influida fuertemente por el SBR en forma directa mientras que el ER y PER lo hacen en forma inversa y en menor medida. Sobre este indicador el efecto de la temperatura del vapor es inverso, pero de poca relevancia

small relevance, while energy losses have a direct influence. The biomass moisture favors this indicator too.

mientras que las pérdidas energéticas influyen de forma directa. La humedad de la biomasa también favorece este indicador.

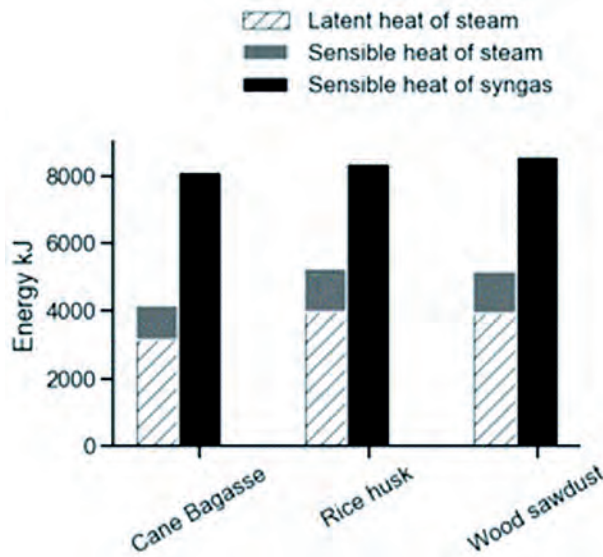


FIGURE 2. Sensitive heat of syngas and steam at intermediate points when gasifying 1 kg of biomass.
 FIGURA 2. Calor sensible del gas de síntesis y vapor en puntos intermedios al gasificador 1 kg de biomasa.

For CGE the determining factor is the non-conversion of carbon, since the more unconverted carbon, the lower the efficiency and, in the same sense, the ER and PER influence and the effect of ER is greater than that of PER. Torch efficiency has a direct effect on EGF.

En la EGF el factor determinante es la no-conversión del carbono pues mientras más carbono no convertido menor es la eficiencia y en igual sentido influyen la ER y PER siendo el efecto de ER superior al de PER. La eficiencia de la antorcha tiene un efecto directo sobre la EGF.

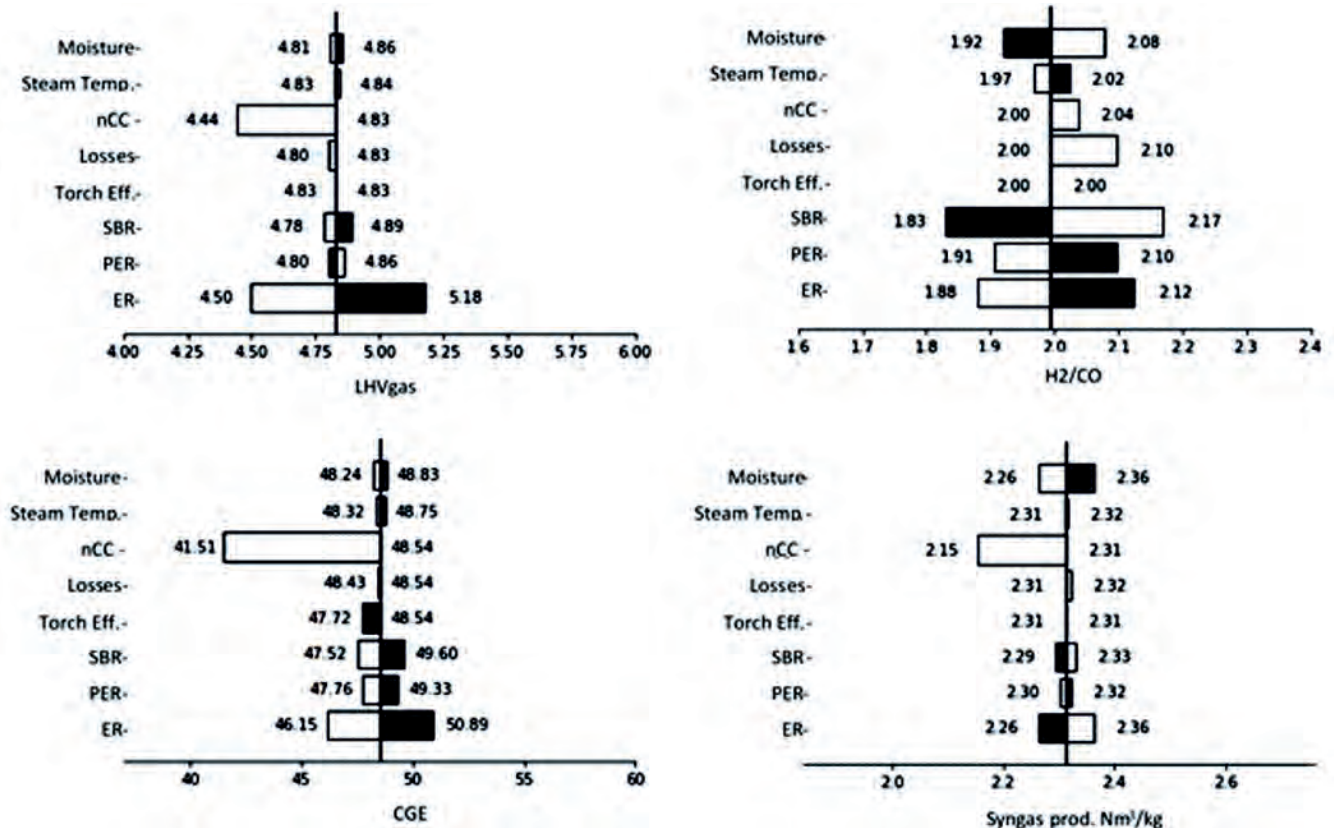


FIGURE 3. Local sensitivity analysis for point I. Sugarcane bagasse.
 FIGURA 3. Análisis de sensibilidad local para el punto I. Bagazo de caña.

Syngas production mainly depends on carbon conversion and to a lesser extent on biomass moisture and ER. The other factors do not affect it appreciably.

CONCLUSIONS

- The method of exploring the regions of operation made possible to study the interactions between the operational parameters with the performance criteria of plasma gasification. In the restricted operation region for the three biomasses, the points where SBR is minimum (ER is minimum and PER maximum) the gas has higher quality, using hydrogen production as a criterion, and the efficiency of cold gas is higher. However, at these points, the electrical consumption of the plasma is higher.
- Of the three biomasses studied, wood sawdust is the most convenient for the process of obtaining syngas rich in hydrogen, since it is possible to produce more hydrogen (97 g / kg of biomass). But, it is also where greater electrical consumption of plasma torches is necessary (2.23 kWh/kg of biomass). In this sense, rice husk presents the worst results with a maximum specific hydrogen production of 54 g/kg of biomass with 27.5 kWh/kg of the produced hydrogen.
- As a final conclusion, this study verified that plasma gasification with mixtures of air and steam as a gasifying agent can be used for the production of a gas rich in hydrogen, with specific productions in the ranges 1.79-2.80, 1.68-2.37 and 2.09- 2.81 NM³/kg from sugarcane bagasse, rice husk and wood sawdust, respectively, and this with a lower electricity consumption per kilogram of hydrogen than that of water hydrolysis.
- Although plasma gasification technology applied to agro-industrial waste is not sufficiently mature globally, it must be seen as a possible path for the production of second-generation biofuels.

ACKNOWLEDGMENT

The authors thank the Cuban energy transformation Integration of renewable intermittent sources in the power system (IRIS) project and the VLIR-IUC-UO Program, for their help to finance this research.

REFERENCES

- DIAZ, G.; SHARMA, N.; LEAL-QUIROS, E.; MUNOZ-HERNANDEZ, A.: "Enhanced hydrogen production using steam plasma processing of biomass: Experimental apparatus and procedure", , 40(5):2091-2098, 2015, DOI:10.1016/j.ijhydene.2014.12.049
- FAVAS, J.; MONTEIRO, E.; ROUBOA, A.: "Hydrogen production using plasma gasification with steam injection", , 42(16):10997-11005, 2017, DOI:10.1016/j.ijhydene.2017.03.109
- HLINA, M.; HRABOVSKY, M.; KAVKA, T.; KONRAD, M.: "Production of high quality syngas from argon/water plasma gasification of biomass and waste", , 34(1):63-66, 2014, DOI:10.1016/j.wasman.2013.09.018
- HRABOVSKY, M.; HLINA, M.; KOPECKY, V.; MASLANI, A.; ZIVNY, O.; KRENEK, P.; SEROV, A.; HURBA, O.: "Steam Plasma Treatment of Organic Substances for Hydrogen and Syngas Production", , 37(3):739-762, 2017, DOI:10.1007/s11090-016-9783-5
- IM-ORB, K.; SIMASATITKUL, L.; ARPORNWICHANOP, A.: "Analysis of synthesis gas production with a flexible H₂/CO ratio from rice straw gasification", , 164361-373, 2016, DOI:10.1016/j.fuel.2015.10.018
- ISMAIL, T. M.; MONTEIRO, E.; RAMOS, A.; EL-SALAM, M. A.; ROUBOA, A.: "An Eulerian model for forest residues gasification in a plasma gasifier", , 1821069-1083, 2019, DOI:10.1016/j.energy.2019.06.070

La producción de syngas, principalmente es dependiente de la conversión del carbono y en menor medida de la humedad de la biomasa y del ER. Los otros factores no la afectan en forma apreciable.

CONCLUSIONES

- El método de exploración de las regiones de operación permitió estudiar las interacciones entre los parámetros operacionales con los criterios de desempeño de la gasificación por plasma. Para las tres biomásas, en la región de operación restringida los puntos donde SBR es mínimo (ER es mínimo y PER máximo) son los puntos donde el gas tiene mayor calidad teniendo como criterio la producción de hidrógeno y también es donde la eficiencia del gas frío es mayor, sin embargo, en estos puntos el consumo eléctrico del plasma es más alto.
- De las tres biomásas estudiadas el aserrín de madera es la más conveniente para el proceso pues es posible producir más hidrógeno (97 gr/kg de biomasa), pero también es donde mayor consumo eléctrico de las antorchas de plasma es necesario (2,23 kWh/kg de biomasa). La cáscara de arroz presenta los peores resultados con un máximo de producción específica de hidrógeno de 54 gr/kg de biomasa con 27,5 kWh/kg de hidrógeno producido.
- Como conclusión final, este estudio comprobó que la gasificación por plasma con mezclas de aire y vapor como agente gasificante puede ser utilizada para la producción de un gas rico en hidrógeno con producciones específicas en los rangos 1,79-2,80, 1,68-2,37 y 2,09-2,81 NM³/kg a partir de bagazo de caña, cascarilla de arroz y aserrín de madera respectivamente, y esto con un consumo eléctrico por kilogramo de hidrógeno inferior al del hidrólisis del agua.
- Aunque la tecnología de gasificación por plasma aplicada a residuos agroindustriales no goza de suficiente madurez a nivel mundial debe ser observada como un posible camino para la producción de biocombustibles de segunda generación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al proyecto Cuban Energy Transformation Integration of Renewable Intermittent Sources in the Power System (IRIS) y al Programa VLIR-IUC-UO, por su ayuda a financiar esta investigación.

- LI, J.; LIU, K.; YAN, S.; LI, Y.; HAN, D.: "Application of thermal plasma technology for the treatment of solid wastes in China: An overview", , 58260-269, 2016, DOI:10.1016/j.wasman.2016.06.011
- LOHA, C.; CHATTOPADHYAY, H.; CHATTERJEE, P. K.: "Thermodynamic analysis of hydrogen rich synthetic gas generation from fluidized bed gasification of rice husk", , 36(7):4063-4071, 2011, DOI:10.1016/j.energy.2011.04.042
- MAVUKWANA, A.; JALAMA, K.; NTULI, F.; HARDING, K. Simulation of sugarcane bagasse gasification using aspen plus. In *International Conference on Chemical and Environmental Engineering (ICCEE), Johannesburg, South Africa*. 2013, vol. 1516, p. 70-74.
- MELGAR, A.; PÉREZ, J. F.; LAGET, H.; HORILLO, A.: "Thermochemical equilibrium modelling of a gasifying process", *Energy Conversion and Management*, 48(1):59-67, 2007, DOI:10.1016/j.enconman.2006.05.004
- MOUNTOURIS, A.; VOUTSAS, E.; TASSIOS, D.: "Solid waste plasma gasification: Equilibrium model development and exergy analysis", *Energy Conversion and Management*, 47:1723-1737, 2006, DOI:10.1016/j.enconman.2005.10.015
- PARTHASARATHY, P.; NARAYANAN, K. S.: "Hydrogen production from steam gasification of biomass: Influence of process parameters on hydrogen yield – A review", *Renewable Energy*, 66:570-579, 2014, DOI:10.1016/j.renene.2013.12.025
- RUTBERG, P. G.; BRATSEV, A. N.; KUZNETSOV, V. A.; POPOV, V. E.; UFIMTSEV, A. A.; SHTENGEL, S. V.: "On efficiency of plasma gasification of wood residues", *Biomass and bioenergy*, 35(1):495-504, 2011, DOI:10.1016/j.biombioe.2010.09.010
- SHIE, J.-L.; CHEN, L.-X.; LIN, K.-L.; CHANG, C.-Y.: "Plasmatron gasification of biomass lignocellulosic waste materials derived from municipal solid waste", *Energy*, 66:82-89, 2014, DOI:10.1016/j.energy.2013.12.042
- SIKARWAR, V. S.; ZHAO, M.; FENNEL, P. S.; SHAH, N.; ANTHONY, E. J.: "Progress in biofuel production from gasification", *Progress in Energy and Combustion Science*, 61:189-248, 2017, DOI:10.1016/j.pecs.2017.04.001
- SMITH, J. M. Introduction to chemical engineering thermodynamics. In.: ACS Publications, 1950.
- TAMOŠIŪNAS, A.; VALATKEVIČIUS, P.; VALINČIUS, V.; LEVINSKAS, R.: "Biomass conversion to hydrogen-rich synthesis fuels using water steam plasma", *Comptes Rendus Chimie*, 19(4):433-440, 2016, DOI:10.1016/j.crci.2015.12.002
- TAVARES, R.; RAMOS, A.; ROUBOA, A.: "A theoretical study on municipal solid waste plasma gasification", *Waste Manag*, 90:37-45, 2019, DOI:10.1016/j.wasman.2019.03.051
- YOON, S. J.; LEE, J.-G.: "Hydrogen-rich syngas production through coal and charcoal gasification using microwave steam and air plasma torch", *international journal of hydrogen energy*, 37(22):17093-17100, 2012, DOI:10.1016/j.ijhydene.2012.08.054
- ZAINAL, Z. A.; ALI, R.; LEAN, C. H.; SEETHARAMU, K. N.: "Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials", *Energy Conversion and Management*, 42(12):1499-1515, 2001, DOI:10.1016/s0196-8904(00)00078-9
- ZHU, Q. High temperature syngas coolers. United Kingdom: 2015.

Jorge Jadid Tamayo Pacheco, Profesor, Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Santiago de Cuba, Cuba, e-mail: Jadid@uo.edu.cu

Leonardo Peña Pupo, Inv., Empresa de Hidroenergía UEB Santiago de Cuba, Cuba, e-mail: Jadid@uo.edu.cu

Arelys Vázquez-Peña, Investigadora, Instituto de Ciencia Animal, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, e-mail: avazpe2015@gmail.com

Ángel Luis Brito Sauvanell, Profesor, Universidad de Oriente, Centro de Estudios de Energía y Refrigeración Facultad de Ingeniería Mecánica, Santiago de Cuba, Cuba, e-mail: Jadid@uo.edu.cu

The authors of this work declare no conflict of interests.

This item is under license Reconocimiento-NoComercial de Creative Commons 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0).

The mention of trademarks of specific equipment, instruments or materials is for identification purposes, there being no promotional commitment in relation to them, neither by the authors nor by the publisher.