



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



ORIGINAL ARTICLE | ARTÍCULO ORIGINAL

# Element for the Estimation of Thermodynamic Properties of Cane and Forest Biomass

## *Elementos para la estimación de propiedades termodinámicas de la biomasa cañera y forestal*

M.Sc. Yanán Camaraza-Medina<sup>1</sup>, Dr.C. Oscar Miguel Cruz-Fonticiella<sup>II</sup>, Dr.C Osvaldo Fidel García-Morales<sup>I</sup>

<sup>I</sup> Universidad de Matanzas, Facultad de Ciencias Técnicas, Matanzas, Cuba.

<sup>II</sup> Universidad Central de Las Villas, Centro de Estudios de Energía, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

**ABSTRACT.** This paper presents the results of the continuity in a research process carried out at the Center for Energy and Environmental Technologies Studies, belonging to “Marta Abreu” Central University of Las Villas, related to obtaining models for the determination of caloric powers and chemical exergy contained in any solid combustible element of biomass origin. The main formulations known in the literature are presented, as well as the results obtained by the authors to represent the lower caloric power and the chemical exergy in terms of elemental composition (C, H, O, N, and S). The formulations obtained correlate with the samples considered between 5% and 15% for the higher caloric power, and between 1.3% and 2.4% for chemical exergy. Based on these correlations, this study provides the relationship between higher caloric power and chemical exergy as a function of the elemental composition of C, H, O, N, and S in the fuel masses that will be used in biomass thermoelectric power stations (TPS) in process of construction in the country.

**Keywords:** Model, ElementaryC omposition, Heat Power, Exergy

**RESUMEN.** En este trabajo se exponen los resultados de la continuidad del proceso de investigación llevado a cabo en el centro de Estudios de Energía y Tecnologías Medio Ambientales, perteneciente a la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, relacionado con la obtención de modelos para la determinación de los poderes calóricos y la exergía química contenida en cualquier elemento combustible sólido de procedencia biomásica. En el presente se muestran las principales formulaciones conocidas en la literatura actualizada, así como los resultados obtenidos por los autores para representar el poder calórico inferior y la exergía química en términos de la composición elemental (C, H, O, N, S). Las formulaciones obtenidas correlacionan con las muestras consideradas entre 5% y el 15% para el poder calórico superior, y entre el 1,3% y el 2,4% para la exergía química. Sobre la base de estas correlaciones, este estudio proporciona la relación existente entre el poder calórico superior y la exergía química en función de la composición elemental de C, H, O, N, S en las masas combustibles que serán utilizadas en las centrales termoeléctricas (CTE) de biomasa en proceso de construcción en el país.

**Palabras clave:** modelo, composición elemental, poder calórico, exergía

### INTRODUCTION

The first challenge in the thermochemical modeling of biomass conversion systems is precisely to model the biomass itself, the raw material. Biomass is not a standard compound and its chemical elemental composition as well as its thermal properties vary significantly. In the vast majority of publications and specialized works on the subject Al-Shemmeri *et al.* (2015), Bilgili *et al.* (2017), different solutions are adopted or suggested. For example, for bioethanol in modeling biomass in Prosim plus, it is represented as a mixture of its chemical components adapting the

### INTRODUCCIÓN

El primer reto en el modelado termoquímico de los sistemas de conversión de biomasa es precisamente modelar la propia biomasa, la materia prima. La biomasa no es un compuesto estándar y su composición química, elemental, así como sus propiedades térmicas varían significativamente. En la inmensa mayoría de las publicaciones y trabajos especializados sobre el tema como Al-Shemmeri *et al.* (2015), Bilgili *et al.* (2017), adoptan o sugieren diferentes soluciones, por ejemplo, para el bioetanol, al modelar la biomasa en Prosim plus, esta se representa como una mezcla de sus componentes químicos adaptando las propiedades de la

properties of glucose, as the chemical formula, the heat of formation and the molecular weight. To represent cellulose, hemicellulose and lignin, Aspen Plus software allows the implementation of organic substances as unconventional solid compounds through the definition of attributes in terms of elemental composition.

The objective of this study is to propose a precise and consistent definition of biomass, especially relevant for the simulation of thermochemical conversion processes. Besides, this work aimed at developing a generic representation of the thermodynamic properties, specifically, the chemical exergy contained in it, that allows quickly calculating the yields of the process, depending on the type of biomass used and only knowing its elemental composition. The model developed is general and can be used in any numerical simulation, but, in this study, it is applied specifically to represent the biomass in the Matlab manager. Likewise, when the obtained results are compared with available experimental values, it is concluded that the results obtained are extremely accurate to be used in practical engineering, since the errors found oscillate in a 2.4% average error.

## METHODS

### Basic Elements on the Fuel Mass Used in the Biomass Thermoelectric Power Stations (TPS) Process

Bagasse is the remaining fibrous lignocellulosic residue of cane stems, obtained at the exit of the last mill in sugar tandem. It is a heterogeneous set of particles of different sizes ranging from 1 to 25 mm, presenting an average fraction of approximately 20 mm. From the physical point of view, the integral bagasse consists of 45% fiber, 2-3% soluble solids and 50% moisture. From the chemical point of view, it consists of 46.6% cellulose, 25.2% of hemicelluloses (pentosans) and 20.7% of lignin. The hemicelluloses comprise a group of different polysaccharides, whose composition has as common characteristics: solubility in solvents, reactivity towards acids and decomposition in sugars and furfural. These properties differentiate them analytically from the rest of the chemical components of bagasse. Lignin, the third component in quantitative importance of bagasse (between 20 and 22%), represents a set of amorphous, reticular polymers of high molecular weights and eminently phenolic nature according to Huang *et al.* (2016), Peduzzi *et al.* (2016); Kiran & Muthukumar (2017).

In order to determine the lower caloric value ( $Q_{lc}$ ) of bagasse, it is necessary to have its elemental composition. However, this is an arduous and difficult task to fulfill because the lower caloric value will vary according to the bagasse humidity concentration. Ashes present also depend on the way of harvesting of the cane and the type of soil, even the bagasse obtained in the same harvest under the same

glucosa, como la fórmula química, el calor de formación y el peso molecular. Para representar la celulosa, la hemicelulosa y la lignina el software Aspen Plus permite la implementación de sustancias orgánicas como compuestos sólidos no convencionales a través de la definición de atributos en términos de composición elemental.

El objetivo de este estudio es proponer una definición precisa y consistente de la biomasa, especialmente relevante para la simulación de procesos de conversión termoquímica. Así como desarrollar una representación genérica de las propiedades termodinámicas, específicamente la exergía química contenida en esta que permita calcular rápidamente los rendimientos del proceso en cuestión, siempre en función del tipo de biomasa que se emplee, siendo necesario solamente disponer de su composición elemental. El modelo desarrollado es general y puede ser utilizado en cualquier simulación numérica, pero en este estudio se aplica para representar la biomasa específicamente en el gestor Matlab. Igualmente al ser comparados los resultados obtenidos con valores experimentales disponibles se llega al consenso que los resultados obtenidos son sumamente precisos para ser empleados en la ingeniería práctica, ya que los errores encontrados oscilan en un 2,4% de error medio.

## MÉTODOS

### Elementos básicos sobre la masa combustible empleada en el proceso de las centrales termoeléctricas (CTE) de biomasa

El bagazo es el residuo lignocelulósico fibroso remanente de los tallos de caña, obtenido a la salida del último molino del tándem azucarero, constituyendo un conjunto heterogéneo de partículas de diferentes tamaños que oscilan entre 1 y 25 mm, presentando una fracción promedio de aproximadamente 20 mm. Desde el punto de vista físico, el bagazo integral se compone de 45% de fibra, 2-3% de sólidos solubles y 50% de humedad, mientras que desde el punto de vista químico, se compone de 46,6% de celulosa, 25,2% de hemicelulosas (pentosanos) y 20,7% de lignina. Las hemicelulosas abarcan un conjunto de polisacáridos diferentes, cuya composición tiene como características comunes: solubilidad en solventes, reactividad frente a los ácidos y descomposición en azúcares y furfural. Estas propiedades las diferencian, analíticamente, del resto de los componentes químicos del bagazo. La lignina, tercer componente en importancia cuantitativa del bagazo, entre 20 y 22%, representa un conjunto de polímeros amorfos, reticulares, de altos pesos moleculares y naturaleza eminentemente fenólica según Huang *et al.* (2016), Peduzzi *et al.* (2016); Kiran & Muthukumar (2017).

Para la determinación del poder calórico inferior ( $Q_{lc}$ ) del bagazo se hace necesario disponer de la composición elemental de este, sin embargo esto en sí es una tarea ardua y difícil de cumplir debido a que el poder calórico inferior va a variar en función de la concentración de humedad que posea el bagazo, las cenizas presentes también dependen de la forma de cosecha de la caña y del tipo de suelo, incluso el bagazo obtenido en una misma cosecha bajo iguales condiciones de labor y en una misma extensión territorial van a variar notablemente. La composición física del bagazo está definida por las características de la planta que le da origen, la

working conditions and in the same territorial extension will vary considerably. Its basic structure formed by small fibers of 2 to 2,5 mm in length, joined by a tissue called parenchyma, which become powder after grinding and is called the core. In the dry bagasse, the fiber constitutes around 70%, while the core is the remaining 30%, approximately. Peduzzi *et al.* (2016) and Camaraza (2017), proposed that the specific heat of combustion of dry bagasse is low with respect to fossil fuels, which is typical of biomass as a young fuel. Recognized national authors, according to Camaraza (2017), report numerically neighboring values of the lower caloric ( $Q_{IC}$ ) power of the bagasse mass in the intervals  $17\ 294 \leq Q_{IC} \leq 18\ 938$  kJ/kg.

### Elemental Composition of the Biomass with the Greatest Nationwide Diffusion

The variation is due to changes in the elemental composition and in the sugar content. In turn, the elemental composition is influenced by the variety and age of the cane, the type of soil of cultivation and the degree of mechanization in the harvesting process. The variation in the sugar content is due to the adjustment of the mills and to the quantity and temperature of the imbibitions water that is supplied to the bagasse during the milling. There is uniformity of criteria on the part of national authors regarding the basic composition of bagasse. In Table 1 the two most employed are shown.

A regional reference work CELAC (2015), provides the rate of moisture decrease in the Sugar Cane Agricultural Waste (RAC) mass, based on the number of harvest days. This tendency to decrease the humidity for normal days after harvest can be described by a correlation established from the values reported. The percentage of moisture in the RAC mass is obtained by the expression (1):

$$\%W = 1,2X^2 - 14,7X + 59,6 \quad (1)$$

Where:

%W- % moisture present in the RAC;

X - number of days from the initial date of harvest.

In Table 1 the following notations are used for the elements:

C, Carbon H, Hydrogen O, Oxygen N, Nitrogen A, Ashes W, Water

For agricultural cane residues (RAC), the most commonly used compositions are given in Table 2. In this Table the notation S is used to denote the elemental composition of sulfur.

For the case of forest biomass, there is a very wide range of varieties used for this purpose, so it is logical that the calorific power varies markedly from species to the other. In the present work, the average compositions for three varieties according to Camaraza (2017), are provided and their elemental composition in percentage is reported in Table 3.

cual posee su estructura básica formada por pequeñas fibras de 2 a 2,5 mm de longitud, unidas por un tejido llamado parénquima, el cual al sufrir el proceso de molienda tiende a convertirse en polvo y recibe el nombre de meollo. La fibra constituye en el bagazo seco alrededor del 70% mientras que el meollo es el 30% restante aproximadamente. En los trabajos de Peduzzi *et al.* (2016) y Camaraza (2017), se plantea que el calor específico de combustión del bagazo seco es inferior con respecto a los combustibles fósiles, lo que es típico de la biomasa por ser un combustible joven. Reconocidos autores nacionales, de acuerdo a lo planteado por Camaraza (2017), reportan valores vecinos numéricamente del poder calórico inferior ( $Q_{IC}$ ) de la masa de bagazo, estando los mismos en los intervalos  $17\ 294 \leq Q_{IC} \leq 18\ 938$  kJ/kg.

### Composición elemental de las biomásas de mayor difusión a nivel nacional

La variación es debida a los cambios en la composición elemental y en el contenido de azúcar, a su vez la composición elemental se ve influida por la variedad y la edad de la caña, el tipo de suelo de cultivo y el grado de mecanización en el proceso de cosecha. La variación en el contenido de azúcar es debido al ajuste de los molinos y a la cantidad y temperatura del agua de imbibición que se suministre al bagazo durante la molienda. Existe uniformidad de criterios por parte de autores nacionales en lo relativo a la composición elemental del bagazo. En la Tabla 1 se proporcionan los dos más empleados de acuerdo con Camaraza (2017).

Una obra de referencia regional CELAC (2015), proporciona la tasa de disminución de la humedad en la masa de Residuos Agrícolas Cañeros (RAC) en función de la cantidad de días de cosecha. Esta tendencia a la disminución de la humedad por días normales después de la cosecha puede ser descrita mediante una correlación establecida a partir de los valores reportados, obteniéndose el porcentaje de humedad presente en los RAC por la expresión (1):

$$\%W = 1,2X^2 - 14,7X + 59,6 \quad (1)$$

donde:

%W- porcentaje de humedad presente en los RAC;

X - número de días desde la fecha inicial de la cosecha.

En la Tabla 1 se emplean las siguientes notaciones para los elementos:

C, Carbono H, Hidrógeno O, Oxígeno N, Nitrógeno A, Cenizas W, Agua

Para el caso de los residuos agrícolas cañeros (RAC), las composiciones más empleadas se proporcionan en la Tabla 2, valores reportados por Camaraza (2017).

En la Tabla 2 la notación S se emplea para designar la composición elemental de azufre.

Para el caso de la biomasa forestal existe una gama muy amplia de variedades empleadas para tal efecto, por lo que el poder calórico es lógico que varíe marcadamente de una especie a la otra. En el presente trabajo se proporcionan las composiciones medias para tres variedades de acuerdo a lo planteado por Camaraza (2017), siendo reportadas en la Tabla 3 su composición elemental en%.

**TABLE 1. Elemental Composition of Bagasse According to the Criteria of Several National Authors Referred by Camaraza (2017)**  
**TABLA 1. Composición elemental del bagazo de acuerdo al criterio de varios autores nacionales, citados por Camaraza (2017)**

Author	Year	Bagasse Elemental Composition (%)					
		C	H	O	N	A	W
ECIAZ (2017)	2017	23,4	3,2	22,0	0,1	1,3	50
ECIAZ (2017) <sup>1</sup>	2017	46,8	6,4	44,0	0,2	2,6	-
Rubio (19) <sup>1</sup>	19	47,0	6,5	44,0	-	2,5	-

<sup>1</sup>Dry Bagasse

**TABLE 2. Elemental Composition of RAC According to the Criteria of Several National Authors Referred by Camaraza (2017)**  
**TABLA 2. Composición elemental de RAC de acuerdo al criterio de varios autores nacionales, citados por Camaraza (2017)**

Author	Year	RAC Elemental Composition (%)						
		C	H	O	N	A	W	S
Rubio (19)	19	5,9	4,1	3,8	0,3	5,8	20	0,1
Rubio (19) <sup>1</sup>	19	44,8	5,2	42,3	0,4	7,2	-	0,1
ECIAZ (2017) <sup>1</sup>	2017	44,9	5,1	42,4	0,3	7,3	-	-

<sup>1</sup>Dry RAC

**TABLE 3. Elemental Composition of Forest Biomass According to Camaraza (2017)**  
**TABLA 3. Composición elemental de biomasa forestal, según Camaraza (2017)**

Species	RAC Elemental Composition (%)						
	C	H	O	N	A	W	S
<i>Caillea Glomerata</i> (Marabú)	0,3	3,6	27,4	0,5	3,2	5	0
<i>Leucaena Glauca</i> (Aroma)	5,9	4	3,6	0,4	3,1	25	0
<i>Leucaena Vulgaris</i> (Soplillo)	3,2	4,2	3,7	0,4	4,5	20	0

The compositions correspond to specimens germinated in brown soils of medium texture and humidity, freshly collected within more than 2 years of existence.

### Analysis of Available and Applicable Formulations in the Determination of Higher Caloric Value in Solid Fuels

In specialized literature (O'Donovan & Grimes, 2014; Huang *et al.*, 2016; Peduzzi *et al.*, 2016; Kiran & Muthukumar, 2017), a considerable group of expressions for the determination of higher caloric power ( $Q_{SC}$ ) of a dry solid fuel is reported. A summary of the most widespread is given in Table 4 according to Peduzzi *et al.* (2016). According to Shukuya (2013), all expressions provided in Table 4 correlate with a smaller error of 7.2% in 92.8%, being expression (4) the one with the worst adjustment, whereas equation (11) shows an average error of 2.4% in 96.8% of the available experimental values. These correlation values were verified by the author with the aid of an optimization function modeled on TK Solver, integrating the experimental quantities reported in Soltani *et al.* (2015) and Kopanos *et al.* (2017), being verified the veracity of this approach.

It is very easy to determine the lower caloric power ( $Q_{IC}$ ) of any biomass by knowing its higher caloric power ( $Q_{SC}$ ). ( $Q_{IC}$ ) is obtained from the following equation according to Peduzzi *et al.* (2016):

$$Q_{IC} = Q_{SC} - 226,0 \cdot H - 25,1 \cdot W \quad (2)$$

A very popular expression among national specialists according to Camaraza (2017), for the determination of the low caloric power of liquid and solid fuels is the Mendeleev equation which is represented by:

### Análisis de las formulaciones disponibles y aplicables en la determinación del poder calórico superior en combustibles sólidos

En la literatura especializada (O'Donovan y Grimes, 2014; Huang *et al.*, 2016; Peduzzi *et al.*, 2016; Kiran y Muthukumar, 2017), reportan un grupo considerable de expresiones para la determinación del poder calórico superior ( $Q_{SC}$ ) de un combustible sólido seco. Un resumen de las más difundidas es proporcionado en la Tabla 4 según Peduzzi *et al.* (2016). De acuerdo a lo planteado por Shukuya (2013), todas las expresiones proporcionadas en la Tabla 4 correlacionan con un error menor del 7,2% en el 92,8% de los datos experimentales, siendo la de peor ajuste la expresión (4) mientras que la ecuación (11) arroja un error medio del 2,4% en el 96,8% de los valores experimentales disponibles. Estos valores de correlación fueron verificados por el autor con la ayuda de una función de optimización modelada en TK Solver integrando las cantidades experimentales reportadas por Soltani *et al.* (2015) y Kopanos *et al.* (2017), siendo comprobada la veracidad de este planteamiento.

Conocido el poder calórico superior ( $Q_{SC}$ ) de una biomasa cualquiera, resulta muy sencillo determinar el poder calórico inferior ( $Q_{IC}$ ) de la misma, el cual se obtiene partir de la siguiente ecuación de acuerdo a Peduzzi *et al.* (2016):

$$Q_{IC} = Q_{SC} - 226,0 \cdot H - 25,1 \cdot W \quad (2)$$

Una expresión muy popular entre los especialistas nacionales según Camaraza (2017), para la determinación del poder calórico inferior de combustibles líquidos y sólidos es la ecuación de Mendeleev la cual queda representada por:

$$Q_{IC} = 339,2 \cdot C + 1030,4 \cdot H - 108,9 \cdot (O - S) - 25,14 \cdot W \tag{3}$$

In Table 4 the elemental compositions are given in % and the caloric powers obtained are expressed in kJ/kg

En la Tabla 4 las composiciones elementales vienen dadas en porcentaje y los poderes calóricos obtenidos son expresados en kJ/kg.

**TABLE 4. Summary of Expressions for the Calculation of Higher Caloric Power ( $Q_{SC}$ ) in Dry Mass Solid Fuels According to Peduzzi et al. (2016)**

**TABLA 4. Resumen de expresiones para el cálculo del poder calórico superior ( $Q_{SC}$ ) en combustibles sólidos de masa seca citados por Peduzzi et al. (2016)**

Author, (Year)	Expression
Dulong, (1880)	$Q_{SC} = 338,29 \cdot C + 1442,77 \cdot H + 94,2 \cdot S - 180,36 \cdot O$ (4)
Mott & Ponner, (190)	$Q_{SC} = 336,2 \cdot C + 1419,33 \cdot H + 94,2 \cdot S - \left(153,24 - \frac{72,01 \cdot O}{100 - A}\right) \cdot O$ (5)
Boie, (193)	$Q_{SC} = 351,7 \cdot C + 1162,49 \cdot H + 104,67 \cdot S - 110,95 \cdot O + 62,8 \cdot N$ (6)
IGT, (1973)	$Q_{SC} = 341,7 \cdot C + 1322,1 \cdot H - 119,8 \cdot (O + N) - 0,01232 \cdot S - 15,3 \cdot A$ (7)
Gravosky y Brain, (1981)	$Q_{SC} = 328 \cdot C + 1430,6 \cdot H + 92,6 \cdot S - 23,7 \cdot N - 40110 \cdot \left(1 - \frac{A}{100}\right) \cdot \frac{H}{C}$ (8)
Ch nniwala-Parikh( 2002)	$Q_{SC} = 349,1 \cdot C + 1178,3 \cdot H + 100,5 \cdot S - 103,4 \cdot O - 15,1 \cdot N - 21,1 \cdot A$ (9)
Shen y Azevedo, (2005)	$Q_{SC} = 313,7 \cdot C + 700,9 \cdot H - 1367,3 \cdot S - 31,8 \cdot O$ (10)
Friedl et al. (2013)	$Q_{SC} = 3,55 \cdot C^2 - 232,2 \cdot C - 2230 \cdot H + 51,2 \cdot (C \cdot H) + 131 \cdot N + 20600$ (11)

Due to the high correlation index provided by the expression (11) according to the authors O'Donovan & Grimes (2014), Huang et al. (2016), Peduzzi et al. (2016), Kiran & Muthukumar (2017), it is considered the most advisable of those provided in the present work, in table # 4. Once the lower calorific power of the fuel has been determined, according to Peduzzi et al. (2016), it is possible to combine the Szargut-Styrylska equation, with a correction provided for the constant  $\beta$ . This formulation, although little known in the literature, is an approximate method with a 2.5% error, which allows determining the chemical exergy of any biomass solid compound (Ersayin & Ozgener, 2015; Huang et al., 2016; Peduzzi et al., 2016; Kiran & Muthukumar, 2017). This method of analysis is given by the following expression:

$$E_Q = \beta \cdot Q_{IC} \tag{12}$$

The coefficient  $\beta$  is determined as:

$$\beta = \frac{1,0412 + 0,216 \frac{H}{C} - 0,2499 \frac{O}{C} \left(1 + 0,7884 \frac{H}{C}\right) + 0,045 \frac{H}{C}}{1 - 0,3035 \frac{O}{C}} \tag{13}$$

Expression (13) is just for  $O/C < 2,42$  and the elemental compositions are in %.

Camaraza (2017), obtained the following equation to determine chemical exergy of a biomass fuel mass.

Debido al alto índice de correlación que brinda la expresión (11) de acuerdo a los autores O'Donovan y Grimes (2014), Huang et al. (2016), Peduzzi et al. (2016), Kiran y Muthukumar (2017), se considera la más recomendable de las proporcionadas en el presente trabajo de la Tabla 4. Una vez que haya sido determinado el poder calórico inferior del combustible, de acuerdo a lo planteado por Peduzzi et al. (2016), es posible combinar la ecuación de Szargut-Styrylska, con una corrección proporcionada para la constante  $\beta$ . Esta formulación aunque poco difundida en la literatura, es un método aproximado con un 2,5% de error, que permite determinar la exergía química de cualquier compuesto sólido biomásico (Ersayin y Ozgener, 2015; Huang et al., 2016; Peduzzi et al., 2016; Kiran y Muthukumar, 2017). Este método de análisis queda dado por la siguiente expresión:

$$E_Q = \beta \cdot Q_{IC} \tag{12}$$

El coeficiente  $\beta$  se determina como:

La expresión (13) es justa para  $O/C < 2,42$  y las composiciones elementales son en porcentaje (%).

Camaraza (2017), obtuvo la siguiente ecuación para la determinación de la exergía química de una masa combustible de origen biomásico.

$$\beta = \left( 0,0143 \frac{C}{O} + 1,5019 \right) \cdot \left( \frac{0,76 - 0,1 \frac{C}{O} + 0,052 \frac{H}{C}}{1 - 0,487 \frac{H}{O}} \right) \quad (14)$$

While the lower caloric power is determined as:

a la par que el poder calórico inferior se determina como:

$$Q_{IC} = 348,3 \cdot C + 882,6 \cdot H - 102,72 \cdot O - 24,8 \cdot W - 10,8 \cdot S + 65,1 \quad (15)$$

Expression (13) is just for  $O/C < 2,77$  and the elemental compositions are in %.

For the case of other solid non-biomass fuels, expression (12) gives erratic results, so it must be transformed to the following:

$$E_{QC} = \beta_{Carb} \cdot Q_{IC} \quad (16)$$

Where:

La expresión (14) es justa para  $O/C < 2,77$  y las composiciones elementales son en porcentaje (%).

Para el caso de otros combustibles sólidos no biomásicos, la expresión (12) proporciona resultados erráticos, por lo que debe ser transformada a la siguiente:

$$E_{QC} = \beta_{Carb} \cdot Q_{IC} \quad (16)$$

and:

$$\beta_{Carb} = 1,0437 + 0,1896 \frac{H}{C} + 0,0617 \frac{O}{C} + 0,0428 \frac{N}{C} \quad (17)$$

A comparison between the expressions (13), (14) and (15) with experimental data reported in the CELAC (2015), Soltani *et al.* (2015) y Bilgili *et al.* (2017), allows confirming the certainty of the stated in the works of Soltani *et al.* (2015) y Kopanos *et al.* (2017), where a maximum error of the order of 2.5% is attributed to expression (12). Through 128 tests performed, the authors showed a 2.48% as maximum error for the expression (12) whereas, for the case of the new expression obtained this error is reduced to 2.44%.

## CONCLUSIONS

- The generalization of available experimental quantities allows confirming what was presented in recent research published in high scientific impact sites, with the following conclusions being drawn:
- The highest caloric power of a biomass fuel mass can be obtained by the expressions given in Table 4 with a mean error of 7.2% in 9.8% of the best available experimental data, being expression (4) the one with the worst adjustment.
- Equation (11) shows an average error of 2.4% in 96.8% of the available experimental values, which makes the authors coincide with the criterion emitted in the references consulted that place it as the most precise expression of those known in the field of action.
- Szargut-Steward's equation allows a maximum error of the order of 2,48% to obtain the chemical exergy contained in a solid biomass fuel, a value that is very close to that reported in recent research.
- Equations (14) and (15) also allow the calculation of the lower caloric power and the chemical exergy of any solid compound with a precision very similar to that obtained with

Una comparación entre las expresiones (13), (14) y (15) con datos experimentales reportados en los trabajos CELAC (2015), Soltani *et al.* (2015) y Bilgili *et al.* (2017), permiten verificar la veracidad de lo planteado en los trabajos de Soltani *et al.* (2015) y Kopanos *et al.* (2017), donde se le atribuye un error máximo del orden del 2,5% a la expresión (12). Un total de 128 pruebas efectuadas por los autores arrojó un 2,48% como error máximo para la expresión (12) mientras que para el caso de la nueva expresión obtenida este error es reducido a un 2,44%.

## CONCLUSIONES

- La generalización de cantidades experimentales disponibles permite confirmar lo planteado en recientes investigaciones publicadas en sitios de alto impacto científico, siendo generadas las siguientes conclusiones:
- El poder calórico superior de una masa combustible de origen biomásico puede ser obtenida mediante las expresiones proporcionadas en la Tabla 4 con un 7,2% de error medio en el 9,8% de los mejores datos experimentales disponibles, siendo la de peor ajuste la expresión 4.
- La ecuación 11, arroja un error medio del 2,4% en el 96,8% de los valores experimentales disponibles, lo que hace coincidir a los autores con el criterio emitido en las referencias consultadas que la ubican como la expresión más precisa de las conocidas en el campo de acción.
- La ecuación de Szargut-Steward permite con un error máximo comprobado del orden del 2,48% obtener la exergía química contenida en un combustible biomásico sólido, valor que es muy cercano al reportado en recientes investigaciones.
- Las ecuaciones 14 y 15 permiten igualmente el cálculo del poder calórico inferior y de la exergía química de cualquier

the use of Szargut-Steward equation, although the applicability of the former is slightly larger.

compuesto sólido con una precisión muy similar a la obtenida con el empleo de la ecuación de Szargut-Steward.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank the indispensable help in the validation of the experimental quantities provided by the Dr. Nislan H. Khandy, of the College of Engineering, Mechanical & Aerospace Engineering Department, New Mexico State University (NMSU), USA.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la ayuda indispensable en la validación de las cantidades experimentales brindada por el Dr. Nislan H. Khandy, del College of Engineering, Mechanical & Aerospace Engineering Department, New Mexico State University (NMSU), EUA.

## REFERENCES / REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-SHEMMERI, T.T.; YEDLA, R.; WARDLE, D.: "Thermal characteristics of various biomass fuels in a small-scale biomass combustor", *Applied Thermal Engineering*, 85: 243-251, 25 de junio de 2015, ISSN: 1359-4311, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.03.055.
- BILGILI, F.; KOÇAK, E.; BULUT, Ü.; KUŞKAYA, S.: "Can biomass energy be an efficient policy tool for sustainable development?", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71: 830-845, 1 de febrero de 2017, ISSN: 1364-0321, DOI: 10.1016/j.rser.2016.12.109.
- CAMARAZA, Y.: *Introducción a la termotransferencia*, Ed. Universitaria, 1.ª ed., La Habana, Cuba, 1121-1184 p., 2017, ISBN: 978-959-16-3286-9.
- CELAC (COMUNIDAD DE ESTADOS LATINOAMERICANOS Y CARIBEÑOS): *Elementos para el análisis costo beneficio de energías renovables no convencionales en Latinoamérica*, Inst. CELAC, Bogotá, Colombia, 76-94pp., 2015.
- ERSAYIN, E.; OZGENER, L.: "Performance analysis of combined cycle power plants: A case study", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43: 832-842, 1 de marzo de 2015, ISSN: 1364-0321, DOI: 10.1016/j.rser.2014.11.082.
- HUANG, Y.W.; CHEN, M.Q.; LI, Y.; GUO, J.: "Modeling of chemical exergy of agricultural biomass using improved general regression neural network", *Energy*, 114: 1164-1175, 1 de noviembre de 2016, ISSN: 0360-5442, DOI: 10.1016/j.energy.2016.08.090.
- KIRAN, N.B.; MUTHUKUMAR, P.: "Empirical Correlation Based Models for Estimation of Air Cooled and Water Cooled Condenser's Performance", *Energy Procedia*, 109: 293-305, febrero de 2017, ISSN: 1876-6102, DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.070.
- KOPANOS, G.M.; LIU, P.; GEORGIADIS, M.C.: "Optimization Methods in condenser systems", [en línea], En: *Advances in Energy Systems Engineering*, Ed. Springer International Publishing, London, United Kingdom, pp. 215-222, 2017, DOI: 10.1007/978-3-319-42803-1, ISBN: 978-3-319-42802-4, Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-42803-1>, [Consulta: 6 de febrero de 2017].
- O'DONOVAN, A.; GRIMES, R.: "A theoretical and experimental investigation into the thermodynamic performance of a 50 MW power plant with a novel modular air-cooled condenser", *Applied Thermal Engineering*, 71(1): 119-129, octubre de 2014, ISSN: 1359-4311, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.06.045.
- PEDUZZI, E.; BOISSONNET, G.; MARÉCHAL, F.: "Biomass modelling: Estimating thermodynamic properties from the elemental composition", *Fuel*, 181: 207-217, octubre de 2016, ISSN: 0016-2361, DOI: 10.1016/j.fuel.2016.04.111.
- SHUKUYA, M.: *Exergy, Theory and Applications*, [en línea], ser. Green Energy and Technology, Ed. Springer, London, United Kingdom, 2013, ISBN: 978-1-4471-4572-1, Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4471-4573-8>, [Consulta: 6 de febrero de 2017].
- SOLTANI, R.; DINCER, I.; ROSEN, M.A.: "Thermodynamic analysis of a novel multigeneration energy system based on heat recovery from a biomass CHP cycle", *Applied Thermal Engineering*, 89: 90-100, 5 de octubre de 2015, ISSN: 1359-4311, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.05.081.

Received: 30/03/2017

Approved: 11/09/2017.

Yanán Camaraza Medina, profesor asistente e investigador de la Universidad de Matanzas, Facultad de Ciencias Técnicas, Matanzas, Cuba y del Centro de Estudios de Energía, Universidad Central de las Villas, "Marta Abreu", Cuba, E-mail: [ycamaraza1980@yahoo.com](mailto:ycamaraza1980@yahoo.com)

Oscar Miguel Cruz Fonticiella, profesor titular e investigador del Centro de Estudios de Energía, Universidad Central de las Villas, "Marta Abreu", Cuba, E-mail: [ocf@uclv.edu.cu](mailto:ocf@uclv.edu.cu)

Oswaldo Fidel García Morales, profesor titular e investigador de la Universidad de Matanzas, Facultad de Ciencias Técnicas, Matanzas, Cuba E-mail: [osvaldo.garcia@umcc.cu](mailto:osvaldo.garcia@umcc.cu)

Note: the mention of commercial equipment marks, instruments or specific materials obeys identification purposes, there is not any promotional commitment related to them, neither for the authors nor for the editor.