

## Potencial energético de las cáscaras de semillas de *Jatropha curcas* y *Moringa oleífera*

### Energy potential of *Jatropha curcas* and *Moringa oleifera* husk

Lisandra de la Caridad Delgado Guilarte<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Química. Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (Cujae). Calle 114 No 11901 entre 119 y 127, Marianao, La Habana, Cuba.

\*Correspondencia: [renia@tesla.cujae.edu.cu](mailto:renia@tesla.cujae.edu.cu)

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



#### Resumen

En Cuba actualmente existen plantas para la producción de biodiesel a partir de oleaginosas como la *Jatropha curcas* y se investiga la posibilidad de obtenerlo a partir de la *Moringa oleífera*. En este proceso se generan grandes cantidades de cáscaras que se convierten en residuos sólidos de no ser utilizadas. Por tal motivo, en el presente trabajo se evaluó la potencialidad de las cáscaras de las semillas de *Moringa oleífera* y *Jatropha curcas* como materia prima para el proceso de gasificación. Mediante la caracterización de las biomásas se determinó que presentan bajo contenido de humedad, cenizas y alto contenido de volátiles. A través de la simulación se obtuvo el flujo volumétrico y el poder calórico del gas de síntesis permitiendo estimar la cantidad de energía producida por hectárea de cultivo de ambas biomásas.

**Palabras clave:** *Jatropha curcas*, *Moringa oleifera*, cáscara, gasificación

#### Abstract

In Cuba there are currently plants for the production of biodiesel from oilseeds such as *Jatropha curcas*, and the possibility of obtaining it from the *Moringa oleifera* is investigated. In this process, large quantities of husks are generated that turn into solid waste if not used. For this reason, in this work we evaluated the potential of the husks of *Moringa oleifera* and *Jatropha curcas* seeds as raw material for the gasification process. Through the characterization of the biomasses it was determined that they have low moisture content, ash and high volatile content. Through the simulation the volumetric flow and the caloric power of the synthesis gas were obtained, allowing estimating the amount of energy produced per hectare of culture of both biomasses.

**Keywords:** *Jatropha curcas*, *Moringa oleifera*, husk, gasification

#### 1. Introducción

La energía es indispensable para el desarrollo social e industrial, por lo que el hombre la ha utilizado desde la antigüedad para facilitar sus condiciones de vida [1]. Los países más desarrollados son los principales consumidores ya que para alcanzar el avance económico e industrial que presentan demandan mayor cantidad de energía [2].

Los combustibles fósiles constituyen la principal fuente de obtención de energía, representando a nivel mundial el 80% con respecto al resto. La excesiva explotación del petróleo, el carbón y el gas natural ha causado la disminución de las reservas de estos y severos daños al medio ambiente, principalmente asociados a la masiva emisión de gases de efecto invernadero. Como consecuencia del agotamiento de los combustibles fósiles se ha elevado el precio del crudo en el mercado, lo que, aparejado a los problemas medioambientales debido a su utilización, han incentivado al hombre a tomar medidas. Un ejemplo resulta la nueva política energética en la que tienen gran participación las fuentes renovables de energía.

A partir de biomásas como las semillas oleaginosas de algunos frutos, se extrae aceite, del cual puede obtenerse biodiesel mediante la reacción de transesterificación. El biodiesel es un combustible alternativo que se utiliza como sustituto del combustible diesel en motores de combustión interna. Su uso se ha puesto en práctica en varias partes del mundo [3].

En Cuba existen plantas de producción de biodiesel a escala local. La materia prima fundamental es el aceite de *Jatropha curcas*. En los próximos años se construirán otras cinco plantas en el país. Por esta razón, actualmente se investigan otras oleaginosas que puedan ser utilizadas para la generación del portador energético. En este sentido, se investiga la *Moringa oleífera* [4].

La segunda etapa del proceso de obtención del biodiesel es la extracción de aceite. Previo a esta etapa se deben separar las cáscaras de los cotiledones, convirtiéndose las primeras en un residuo sólido de no ser utilizadas [5]. A partir de lo antes expuesto se define como objetivo de la investigación evaluar la potencialidad de las cáscaras de las semillas de *Moringa oleífera* y *Jatropha curcas* como materia prima para la gasificación.

Cuba se ha comprometido a dejar de emitir a la atmósfera seis millones de toneladas de CO<sub>2</sub> al año, como parte de un programa integral y flexible del gobierno en aras de cambiar la matriz energética del país y llegar al 2030 con el 24% del total de la electricidad generada, a partir del uso de fuentes renovables. Desde esta instancia, se encuentran en proceso de montaje 3 de las 25 plantas bioeléctricas, que se prevén en todo el territorio para alcanzar una generación de 4 300 GW/h al año y cubrir el 14% del 24 previsto a partir de fuentes renovables de energía. Las plantas aprovecharán los residuos de la industria azucarera (bagazo) y la biomasa forestal, principalmente el marabú, una planta introducida en la isla que ha invadido las tierras. De hecho, cubre más de un millón de hectáreas, hasta el momento, improductivas para su uso en la agricultura u otras áreas.

Ante la crisis de la energía fósil, vulnerabilidad del suministro de estas materias primas o amenazas del calentamiento global, el empleo de la biomasa como fuente de energía aporta una serie de posibles ventajas. Por ejemplo, el balance positivo de CO<sub>2</sub> y de energía, la utilidad de suelos anteriormente no productivos, la creación de empleo rural o las mejoras en la balanza de pagos de los países deficitarios en energía [6].

El proceso de gasificación de biomasa se lleva a cabo en un reactor conocido como gasificador en el que la presión puede ser atmosférica o superior. En este la celulosa en presencia de un agente gasificante, dígame el gas, o mezcla de ellos, que aporta calor para iniciar las reacciones y oxígeno, se transforma en hidrocarburos más ligeros. La mezcla de gases resultantes de la gasificación se le nombra gas de síntesis y está compuesta fundamentalmente por CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, monóxido de carbono (CO), dihidrógeno (H<sub>2</sub>) y

dinitrógeno ( $N_2$ ). Además tiene un poder calórico inferior equivalente a la sexta parte del PCI del gas natural, cuando se emplea aire como agente gasificante.

El rendimiento del proceso de gasificación depende de múltiples factores como la composición química y propiedades físicas de la biomasa, relación aire/combustible la temperatura de gasificación y el agente gasificante que se utilice. En un intervalo de valores de 70 a 80% puede variar la eficiencia de gasificación, ya que parte de la energía introducida en el combustible se invierte en las reacciones endotérmicas, en las pérdidas de calor de los reactores, en el enfriamiento del gas de síntesis y en el lavado (cuando es necesario eliminar los alquitranes). La gasificación permite obtener altos rendimientos eléctricos a partir de biomasa, de hasta un 32% mediante el uso de moto-generadores accionados por gas de síntesis [7]. La composición química de la biomasa puede determinarse mediante los análisis próximo y último. El análisis próximo da información sobre el contenido de humedad, cenizas, carbono fijo y los volátiles que hay presente en la biomasa. Estos datos son importantes a la hora de elegir la tecnología de gasificación y el tiempo de residencia en el reactor, para reducir al máximo los inquemados carbonosos de la biomasa.

La *Moringa oleífera*, es nativa de la región sur del Himalaya. En los últimos siglos, dicho árbol se extendió a lo largo de la franja tropical, desde el sur de la India hasta Asia sudoriental y occidental, Península Arábiga, África subsahariana y América Central. Es un árbol de madera blanda con una demanda relativamente baja de nutrientes y agua, siendo un cultivo fácilmente explotable. El tallo del árbol de Moringa puede alcanzar los 12 m de altura; solo crece recto hasta los 2 m, que es el momento donde comienza la ramificación. La vida útil del árbol de Moringa puede alcanzar los 20 años con una alta producción de hojas, vainas y semillas, productos que pueden ser valorizados en diferentes mercados. La condición de temperatura óptima para el cultivo de Moringa es de 25-35°C. Esta planta tolera los suelos áridos y semiáridos y tiene un intervalo de pH del suelo de 4,5-9,0. Las flores tienen sépalos blancos y amarillentos colocados en panículas y dan origen a frutos similares a vainas, las que contienen semillas de forma redonda que presentan de un 30-45% de aceite [8,9].

La *Jatropha* tiene su origen histórico en América Central y en las partes septentrionales de América del Sur, con una historia de cultivo en el sur de Asia, India y África. Se puede cultivar en todos los países que se encuentran bajo las zonas tropicales y subtropicales, y en algunos que caen en climas templados; también en ciertas áreas de las regiones áridas y subáridas. La *Jatropha curcas* es un árbol pequeño o arbusto grande con corteza gris lisa. Tiene hojas grandes de verde a verde pálido, alternas a sub-opuestas. Puede alcanzar el árbol hasta 5 m de altura. Las plantas de *Jatropha* comienzan a ceder desde el segundo año de siembra, pero la cantidad es limitada [10]. Esta planta tiene un alto potencial agroindustrial debido a sus diversos productos potencialmente beneficiosos. También se usa en la producción de medicamentos, jabón y cosméticos en varios países tropicales. La torta de la semilla rica en proteínas residual, que queda después de la extracción del aceite, podría ser un ingrediente importante en alimentos para animales si pudiera desintoxicarse. Tradicionalmente, se usa para prevenir y/o controlar la erosión, para recuperar tierras o para actuar como una cerca viviente para excluir animales de granja. Muchas partes de la planta tienen un potencial medicinal y comercial, como el tanino de la corteza para tratar el cuero, la miel de su flor y el látex de tallo como fuente de componentes farmacéuticos. Las hojas se pueden utilizar para alimentar gusanos de seda, antisépticos o remediar dermatitis. El pelaje de *Jatropha* es un material rico en azúcar y se puede usar como fertilizante verde o para la producción de biogás. Sus semillas contienen aproximadamente 30-40% de aceite, que tiene una composición de ácidos grasos similar [10,11].

La *Jatropha curcas* y la *Moringa oleífera* son dos biomásas altamente valoradas en Cuba para la producción de biodiesel como alternativa de sustitución al combustible diesel [3,4]. Para ambas biomásas se debe destacar la cantidad significativa de aceite no comestible contenido en sus semillas lo que las convierte en alternativas atractivas para la producción del biocombustible.

Entre los diferentes métodos de producción de energía a partir de biomasa, la gasificación se considera como la opción más adecuada, ya que es un proceso simple y económicamente viable para producir energía térmica o eléctrica lo que ha conllevado a que en la actualidad sea uno de los métodos de conversión termoquímica que más se emplea. Por esta razón, varios son los estudios que se han realizado sobre el proceso de gasificación. Diversos autores han utilizado el programa Aspen Plus, dada sus características, para realizar la simulación de las diferentes etapas que se llevan a cabo para obtener un gas de síntesis y analizarlas [12-15].

## 2. Materiales y Métodos

Las semillas de *Moringa oleífera* provienen del banco de germinación que se encuentra en el Centro de Productos Naturales, ubicado en Siboney, La Habana. En este lugar se reciben las semillas procedentes de los campos de cultivo, donde se clasifican en aptas o no para el proceso de germinación. Las semillas que no cumplen con las normas establecidas para la siembra se convierten en un producto de desecho. De acuerdo con lo anterior en el presente trabajo se emplean las declaradas no aptas. Las semillas de *Jatropha curcas* son suministradas por la planta de producción de biodiesel “Granja Paraguay”, situada en la provincia Guantánamo.

Para realizar la caracterización de las cáscaras, se preparan las muestras de acuerdo con lo establecido en la norma DIN EN 14780. El contenido de humedad de las muestras, se determina según la norma DIN EN 14774-3. El contenido de cenizas a 550°C presente en las muestras se realiza cumpliendo con la norma para biocombustibles sólidos DIN EN 14775. La composición de las cenizas se determina según la norma DIN EN ISO 11885. El porcentaje de volátiles se calcula según la norma DIN EN 15148. El contenido de carbono fijo para cada una de las muestras se determina mediante DIN EN 15148. El poder calórico superior (PCS) se determina según la norma DIN EN 14918. El PCI se determina teniendo en cuenta el PCS y las fracciones másicas de los componentes elementales, y de igual manera a partir de la composición elemental de la biomasa.

Estrategia de simulación:

- Configurar la simulación (unidades, opciones de informe, componentes involucrados, métodos de propiedades físicas y el tipo de corriente).
- Definir el diagrama de flujo: bloques y corrientes.
- Introducir los datos en los módulos empleados (corrientes y equipos)
- Efectuar la simulación.

El método de propiedades que se utiliza es Redlich-Kwong-Soave ecuación cúbica de estado con la función alfa Boston-Mathias (RKS-BM). Este se recomienda para el procesamiento de gas, refinerías y petroquímicas donde se emplean mezclas no polares o ligeramente polares (ejemplos son los hidrocarburos y los gases ligeros, tales como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, y H<sub>2</sub>S). La biomasa y las cenizas se declaran como componentes no convencionales. Estos son sólidos heterogéneos que no participan en el equilibrio de fases químico. Las propiedades físicas que se calculan para estos son la entalpía y la densidad. En la

simulación, los modelos de entalpía y densidad asignados para los componentes no convencionales son HCOALGEN y DCOALIHT respectivamente. El modelo HCOALGEN utiliza los análisis próximo, último y de azufre para calcular la entalpía.

La descripción de los módulos que representan a los equipos se muestra en la Tabla 1; los parámetros de operación de estos se establecen de acuerdo con lo expuesto en el manual del gasificador.

El tratamiento se divide en tres etapas tal y como se reporta por [7, 8].

**Tabla 1.** Descripción de los módulos que representan a los equipos

Módulos	Temperatura (°C)	Presión (kPa)	Descripción
<i>RYield</i>	300	101,3	Modela un reactor especificando los rendimientos de la reacción de cada componente. No requiere de la estequiometría de la reacción y la cinética para estimar sus resultados.
<i>RGibbs-1</i>	1400	101,3	Calcula el equilibrio de fases y el químico al minimizar la energía libre de Gibbs del sistema.
<i>RGibss-2</i>	1050	101,3	
<i>SSplit</i>	-	-	Separa los sólidos de los gases. Se especifica la fracción en la que se desea separar cada uno.
<i>Heater</i>	40	101,3	Enfría la corriente que se le alimente a la temperatura deseada.

#### *Especificaciones de las corrientes*

En las especificaciones globales de la simulación se selecciona MIXCINC como clase de corriente ya que en la simulación que se efectúa tienen lugar tres tipos de subcorrientes:

- MIXED: todos los componentes participan en la fase de equilibrio
- CISOLID: es usada para sólidos homogéneos que tienen una masa molecular definida como el carbono
- NC: se utiliza para sólidos heterogéneos que no tienen su masa molecular definida como sucede con la biomasa y las cenizas

La calidad del gas de síntesis está sujeta a la influencia de numerosos factores en el proceso de gasificación. Con el objetivo de hallar los parámetros de operación más adecuados del reactor que permitan obtener un gas de síntesis con características similares a las expuestas en el manual del gasificador COMBO-40, se realizó un análisis de sensibilidad, donde se observa la composición del gas y su PCI cuando varían la razón de equivalencia y la temperatura de la etapa de reducción. La razón de equivalencia se varía en el intervalo de 0,20 a 0,40. El análisis respecto a la influencia de la temperatura en los resultados se realiza entre valores de 700 a 1 400°C [7,16]. Posteriormente para las mejores condiciones de operación obtenidas se determina la eficiencia de gasificación ( $\eta_{GF}$ ).

### 3. Resultados y Discusión

Los resultados del análisis de humedad se muestran en la Tabla 2. Se observa que la humedad promedio para las cáscaras de *Moringa oleífera* es 6,25%. La humedad promedio de las cáscaras de *Jatropha curcas* es de 9,19%, similar al 9,96% obtenido por Kratzeisen [7]. La humedad de las biomásas analizadas es inferior al 10%, lo que resulta conveniente en un proceso de gasificación. Las biomásas con valores de humedad superiores al 30% pueden deteriorarse por la acción de microorganismos y demandan más energía para producir la combustión, disminuyendo la calidad del gas de síntesis [18].

<b>Tabla 2. Contenido de humedad</b>	
<b>Muestras</b>	<b>Contenido de humedad (%)</b>
<b><i>Moringa oleífera</i></b>	6,25 ± 0,09
<b><i>Jatropha curcas</i></b>	9,19 ± 0,15

Las cenizas son la fracción inorgánica no combustible de la biomasa que queda después de una combustión completa [19]. El contenido de estas que se obtiene para las cáscaras de *Moringa oleífera* y *Jatropha curcas* se muestra en la Tabla 3.

<b>Tabla 3. Contenido de las cenizas en las biomásas analizadas</b>		
<b>Contenido de cenizas (%)</b>	<b>550°C</b>	<b>815°C</b>
<b><i>Moringa oleífera</i></b>	2,97 ± 0,04	2,80 ± 0,01
<b><i>Jatropha curcas</i></b>	4,12 ± 0,05	3,08 ± 0,16

Como se observa en la Tabla 3, los contenidos de cenizas a 550 y 815°C para la *Jatropha* son superiores que los de *Moringa*. La diferencia que existe entre el contenido a 815°C con respecto al de 550°C para ambas biomásas, puede deberse a la descomposición de carbonatos, oxalatos, cloruros y otras sales inorgánicas y la volatilización de metales alcalinos y otros metales pesados que ocurren a temperaturas elevadas. Singh en estudio sobre el aprovechamiento de las diferentes partes del fruto de la *Jatropha curcas* para la producción de energía, obtiene para la cáscara de la semilla un contenido de cenizas de 3,97%, valor similar al determinado en el presente trabajo [20]. Sin embargo, Prasad [21] reporta un contenido de cenizas superior para cáscaras de *Jatropha curcas* utilizadas en un gasificador de corrientes



ascendentes. Martín [22] en investigación preliminar sobre la caracterización de biomásas cubanas, que tienen potencial para la producción de biodiesel, entre ellas la *Moringa oleífera*, obtiene que las cáscaras de las semillas de esta especie contienen 4,10% de cenizas; la diferencia con los resultados de esta investigación puede deberse a la procedencia de las semillas.

El conocimiento de la composición química de las cenizas en la biomasa es importante para predecir si durante la conversión termoquímica de esta puede ocurrir la formación de escoria, debido a la exposición a elevadas temperaturas de los minerales.

En la Tabla 4 se observa que los componentes principales en las cenizas de las cáscaras de las semillas de *Moringa oleífera* en orden descendente son potasio (K), calcio (Ca), fósforo (P), azufre (S), magnesio (Mg) y sodio (Na). Este resultado difiere a los de *Jatropha Curcas* ya que los elementos que destacan en las cenizas de las cáscaras de su semilla son fundamentalmente Ca, K y Mg, mientras que presentan un bajo contenido de Na, P, S, lo que resulta similar a los valores que obtienen Kratzeisen [17] para las cenizas de la misma biomasa.

Elementos tales como K, Na, Ca, Mg, Silicio (Si) y P en las cenizas puede ocasionar la presencia de los mismos en los productos de la conversión termoquímica debido a su alta volatilidad. Por lo tanto, después de vaporizarse pueden condensar al pasar por zonas más frías del reactor. Las incrustaciones y escorias que más afectan se producen cuando hay una alta concentración de alcalinos en combinación de azufre y cloro. Existen varios elementos químicos en las cenizas que influyen en el comportamiento de su punto de fusión. El Ca y el Mg tienen un efecto creciente en la temperatura de fusión, por lo que coincide con los resultados obtenidos para las cáscaras de *Moringa oleífera* y *Jatropha curcas*. La combinación de K y Si tiende a disminuir el punto de fusión de las cenizas, pero esto no debe ocurrir para las biomásas que se estudian pues, aunque presentan un alto contenido de K, tienen bajo contenido de Si.

El contenido de volátiles se libera en forma de gas cuando la biomasa es expuesta a calentamiento. La presencia de altos valores de este en la composición de la biomasa tiene efectos positivos en los procesos de conversión termoquímica donde se puede incrementar el rendimiento de obtención del bioaceite y gas de síntesis. Los resultados que se obtienen para las muestras que se analizan se reflejan en la Tabla 5; estos se encuentran en el intervalo de 65-85% que reporta la literatura para el contenido de volátiles en la biomasa [23].

Los resultados obtenidos para composición elemental para ambas biomasa se muestran en la Tabla 6. La cantidad de carbono fijo que se obtiene para las cáscaras de las semillas de *Moringa oleífera* tiene un valor de 21,77%, el cual es ligeramente inferior al 27,17%, que se alcanza para la *Jatropha curcas*. Shingh [20] reporta para la *Jatropha* un valor de 24,99%. La diferencia de este valor con el que se obtiene en el presente trabajo puede deberse a ligeras variaciones en las características de las plantas como resultado de las condiciones en que son cultivadas. El conocimiento de la relación contenido de volátiles y carbono fijo es esencial para el control del proceso de combustión, específicamente el suministro secundario de aire para garantizar la combustión completa de los compuestos gaseosos [17].

**Tabla 4.** Composición de las cenizas (mg/kg) de las cáscaras de las semillas de *Jatropha* y *Moringa*

	<i>Jatropha curcas</i>	<i>Moringa oleífera</i>
<b>Calcio</b>	<b>165 000</b>	<b>152 000</b>
<b>Sodio</b>	9 600	19 000
<b>Potasio</b>	155 000	186 000
<b>Magnesio</b>	55 200	50 700
<b>Fósforo</b>	5 900	65 300
<b>Azufre</b>	5 700	54 000
<b>Silicio</b>	34	59
<b>Aluminio</b>	600	1 100
<b>Boro</b>	538	306
<b>Plomo</b>	< 50	< 50
<b>Zinc</b>	240	464
<b>Manganeso</b>	218	203
<b>Bario</b>	56	37
<b>Cobalto</b>	< 20	< 20
<b>Cromo</b>	< 20	24
<b>Cobre</b>	130	190
<b>Níquel</b>	< 20	25
<b>Cadmio</b>	< 10	< 10
<b>Titanio</b>	34	59

**Tabla 5.** Contenido de componentes volátiles

<b>Muestras</b>	<b>Componentes volátiles (%)</b>
<i>Moringa oleífera</i>	75,26 ± 0,25
<i>Jatropha curcas</i>	68,71 ± 0,12



**Tabla 6.** Composición elemental de las cáscaras de *Moringa oleífera* y *Jatropha curcas*

Muestras	C	N	S	H	O
<i>Moringa oleífera</i>	51,49 ± 0,66	1,52 ± 0,03	0,56 ± 0,01	6,65 ± 0,10	36,80
<i>Jatropha curcas</i>	49,04 ± 1,47	0,60 ± 0,03	0,44 ± 0,03	5,76 ± 0,16	40,03

En la Tabla 7 se muestran los resultados de la determinación del poder calórico inferior a partir de la composición elemental de las biomásas que se estudian. Los valores que se obtienen para ambas especies son similares; estos se afectan positivamente por los contenidos de C y H, pero negativamente por el O, N y el contenido de cenizas. Sin embargo, el contenido de O influye influye positivamente en la eficiencia de conversión, ya que la transformación del carbono a CO depende de dicho elemento en la biomasa para provocar la reacción de autogasificación [19].

**Tabla 7.** Contenidos calórico de las biomasa analizadas

Biomasa	PCI (MJ/kg)	PCS (J/g)
<i>Moringa oleífera</i>	20,34	22 271
<i>Jatropha curcas</i>	18,23	19 842

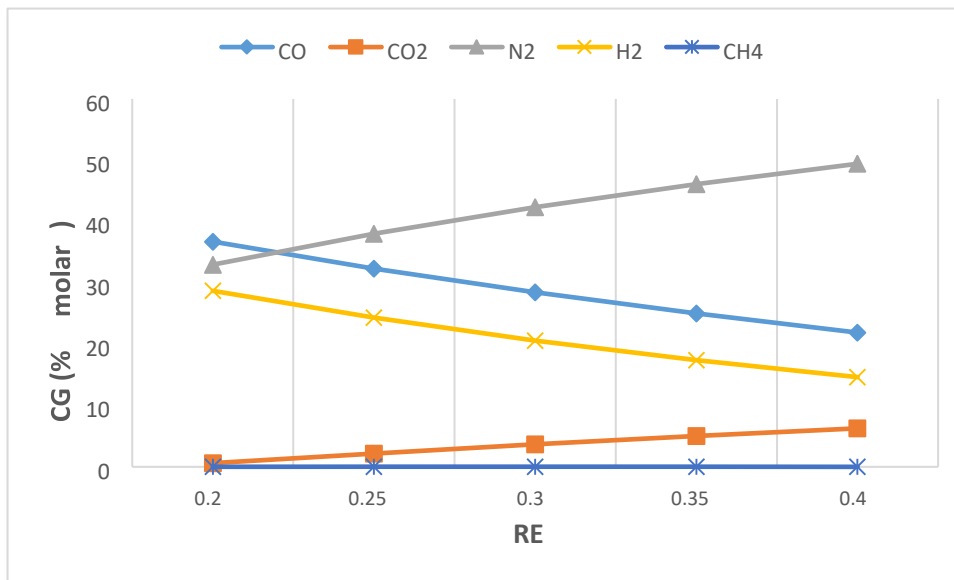
La simulación del proceso de gasificación de las cáscaras de las semillas de *Jatropha curcas* y *Moringa oleífera* se desarrolla según lo descrito en el acápite anterior. La razón de equivalencia (RE) es 0,30. Se desarrolla la simulación considerando los resultados que se presentan en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Características del gas de síntesis para ER igual a 0,30

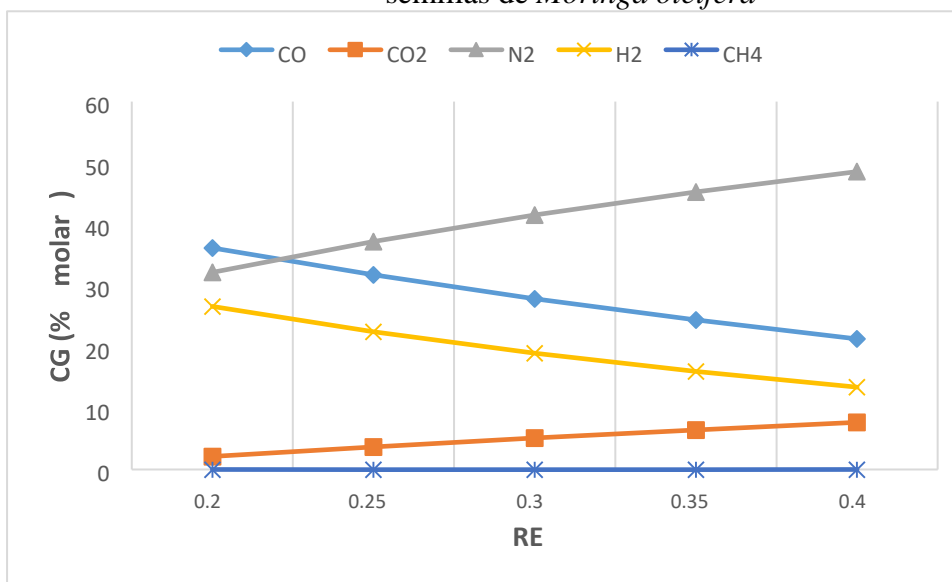
Biomasa	Gas de síntesis					
	Composición (% molar)					
	PCI (MJ/m <sup>3</sup> )	CO	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
<i>Moringa oleífera</i>	5,81	28,40	3,67	42,40	20,53	2,53. 10 <sup>-4</sup>
<i>Jatropha curcas</i>	5,57	27,85	5,14	41,5	18,98	1,49. 10 <sup>-4</sup>

De la Tabla 8 se observa que el valor de las composiciones de CO, H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en el gas de síntesis de las cáscaras de la semilla de *Moringa* son superiores a las del portador energético proveniente de las cáscaras de *Jatropha*, lo que puede influir en que el poder calórico que se obtiene para la *Moringa* sea mayor que para la *Jatropha*. Los valores que se obtienen presentan semejanza a los reportados en el manual de operación del gasificador COMBO-40. Las diferencias que existen se pueden deber a que el fabricante (ANKUR) reporta valores obtenidos con su diseño a partir del uso de otras biomásas en su

alimentación. Para evaluar la influencia de los parámetros de operación del gasificador en la calidad del gas de síntesis obtenido, y determinar los que permiten obtener un gas con características similares a las reportadas en el manual del gasificador COMBO-40, se realiza un análisis de sensibilidad. Los resultados se observan en las Figuras 1-8.



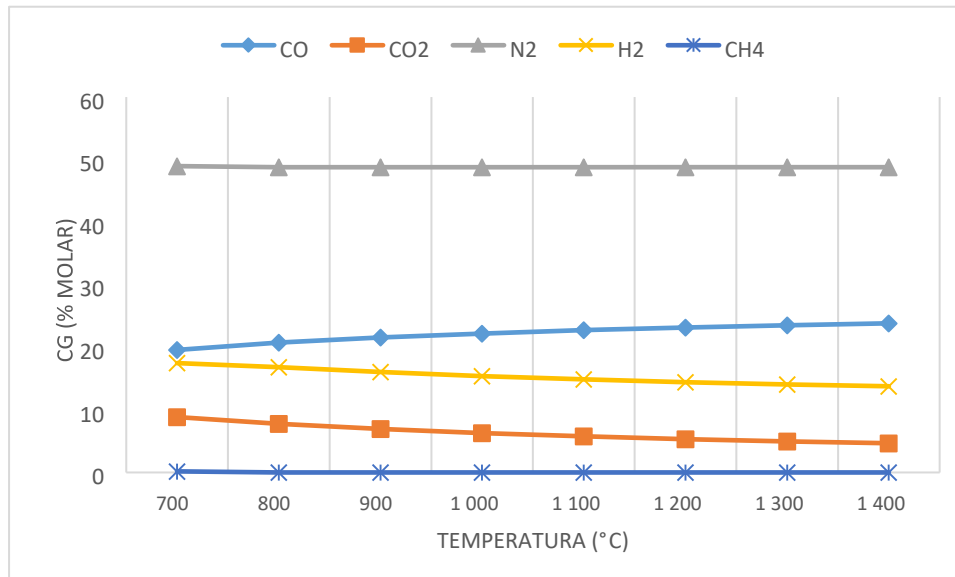
**Fig.1** Efecto de RE en la composición del gas de síntesis obtenido a partir de las cáscaras de las semillas de *Moringa oleífera*



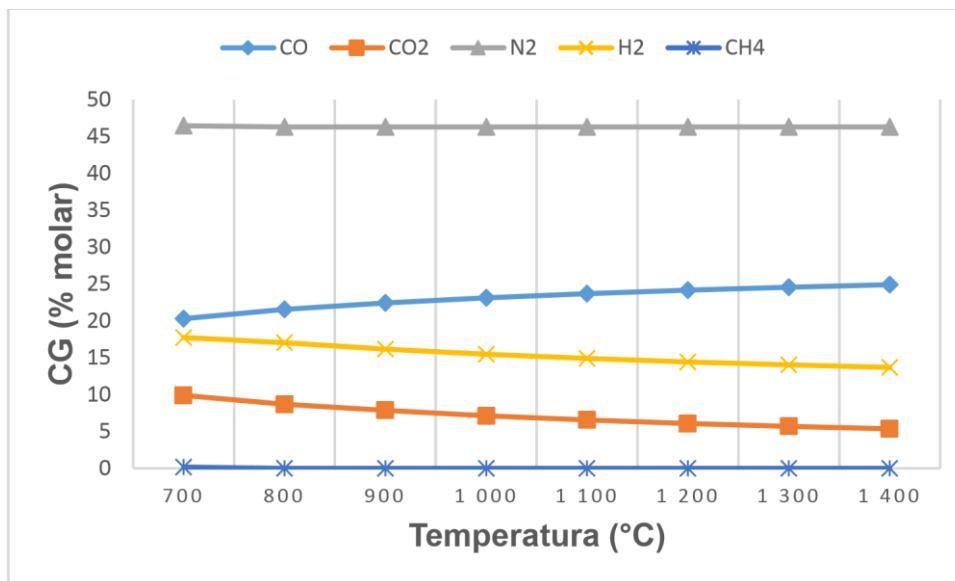
**Fig.2** Efecto de RE en la composición del gas de síntesis obtenido a partir de las cáscaras de las semillas de *Jatropha curcas*

Un incremento de la temperatura provoca una disminución del contenido H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> en el gas para ambas biomásas. Para el CO sucede lo contrario, lo que puede deberse a que predomine la reacción de Boudouard, que por ser endotérmica y considerarse el sistema en equilibrio se favorece la formación de los productos. De igual manera puede suceder si se considera la reacción exotérmica de cambio agua-

gas, ya que un incremento de la temperatura conlleva a que el equilibrio se desplace favoreciendo a los reaccionantes.



**Fig.3** Efecto de la temperatura en la composición del gas de síntesis obtenido a partir de las cáscaras de las semillas de *Moringa oleífera*



**Fig.4** Efecto de la temperatura en la composición del gas de síntesis obtenido a partir de las cáscaras de las semillas de *Jatropha curcas*

El aumento de la razón de equivalencia conduce a que disminuya la composición de H<sub>2</sub> y CO en el gas de síntesis, ya que pueden también combustionar con el oxígeno, de esta manera se reduce su poder calórico inferior. El gas de síntesis de las biomásas que se estudian presenta este comportamiento. Cuando se utilizan las cáscaras de las semillas de *Moringa oleífera* y *Jatropha curcas* como

alimentación al gasificador COMBO-40 y se fijan los parámetros de operación seleccionados, la eficiencia de gasificación resulta ser de 79,50 y 79,18% para cada una de las biomásas respectivamente. Estos resultados se encuentran en el intervalo de 70-80% de valores de eficiencia que reportan varios autores para el proceso de gasificación [24,25].

A partir del gas de síntesis, producto de la gasificación de las biomásas, se obtiene una energía que puede ser aprovechada en el proceso de producción de biodiesel, reduciendo así la acumulación de residuos sólidos. En el proceso de producción de biodiesel es frecuente realizar calentamientos, para lo cual se recurre a sistemas eléctricos. Generalmente la generación de electricidad en estos procesos se logra a partir del empleo de combustible diesel; sin embargo, utilizar en su lugar el gas de síntesis proveniente de biomásas puede reducir los gastos por importaciones y las afectaciones medioambientales que causa el combustible fósil. Si el sistema de calentamiento implica la quema de combustible diesel para generar electricidad entonces pueden existir ahorros en este sentido de 466 y 805 L de este combustible por cada hectárea de Moringa y Jatropha respectivamente, acorde a resultados derivados de este estudio y no mostrados en presente artículo.

#### 4. Conclusiones

Las cáscaras de semillas de *Moringa oleífera* y *Jatropha curcas* tienen un contenido de humedad y de cenizas inferior al 10%, mientras que los componentes volátiles están alrededor del 70%. Ambas biomásas tienen alto contenido de carbono y bajo de nitrógeno y azufre. Se simula el proceso de gasificación, obteniéndose para ambas biomásas la composición, el poder calórico y el volumen del gas de síntesis. La producción energética anual por hectárea a partir de las cáscaras de semillas de *Moringa oleífera* y *Jatropha curcas* es de 17 968 y 31 002 MJ respectivamente.

#### Referencias

1. Salaet, S., Roca, J., *Agotamiento de los combustibles fósiles y emisiones de CO<sub>2</sub>: algunos posibles escenarios futuros de emisiones*. Revista Galega de Economía, 2010. **19**: p. 1-19.
2. Bulla, E., *Diseño del proceso de producción del biodiesel a partir de aceites de fritura*. Tesis para optar por el título de Magíster en Ingeniería, 2014. Universidad Nacional de Colombia.
3. Colectivo de Autores, *Biocombustibles para su uso en motores diesel*, 2014. La Habana: IDICT.
4. Colectivo de Autores, *La biomasa como fuente renovable de energía en el medio rural*, 2012. Cuba.
5. Achten, W., et al. *Jatropha bio-diesel production and use*. Biomass and Bioenergy, 2008. **32**: p. 1063-1084
6. Romero, A., *Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles*. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 2010. **104**: p 331-345.
7. Juárez, M., *Análisis de la problemática e investigación de aspectos avanzados de la generación eléctrica con biomasa*. Tesis para optar por el título de Doctor en Ciencias, 2013. Universidad de La Rioja.
8. Raman, J., et al., *A review on Moringa tree and vetiver grass-Potential biorefinery feedstocks*. Bioresource Technology, 2018. **249**: p. 1044-1051.
9. Díaz, Y., et al., *Extraction and characterization of Moringa oleífera Lam var. Supergenius seed oil from Cuba*. Revista CENIC Ciencias Químicas, 2017. **48**: p. 17-26
10. Abdul, H., et al., *A Jatropha biomass as renewable materials for biocomposites and its applications*. Renewable and Energy Reviews, 2013. **22**: p. 667-685

11. Piloto R., et al., *Characterization of Jatropha curcas oils and their derived fatty acid ethyl esters obtained from two different plantations in Cuba*. Biomass and Bioenergy, 2011. **35**: p. 4092-4098.
12. Molino, A., et al., *Biomass gasification technology: The state of the art overview*. Journal of Energy Chemistry, 2016. **25**: p. 10-25.
13. Cujia, G., Bula, A., *Potencial obtención de gas de síntesis para la producción de metanol a partir de la gasificación de residuos de palma africana*. Interciencia, 2010. **32**: p. 106-112.
14. Onabanjo, T., et al, *Energy recovery from human faeces via gasification: A thermodynamic equilibrium modelling approach*. Energy Conversion and Management, 2016. **118**: p. 364-376.
15. Agung, N., et al, *Simulation of Jatropha curcas shell in gasifier for synthesis gas and hydrogen production*. Journal of the Energy Institute, 2017. **90**: p. 672-679.
16. Puig, M-A., et al., *A. Review and analysis of biomass gasification models*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010. **14**: p. 2841-2851.
17. Kratzeisen, M., Müller, J., *Suitability of Jatropha seed shells as fuel for smallscale combustion units*. Renewable Energy, 2013. **51**: p. 46-52.
18. García, L., *Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo*. Tesis para optar al título de Magíster en Ingeniería Mecánica, 2011. Universidad Nacional de Colombia.
19. Salaheldeen, M., et al., *M. An evaluation of Moringa peregrina seeds as a source for bio-fuel*. Industrial Crops & Products, 2014. **61**: p. 49-61.
20. Singh, R.N., et al., *SPRERI experience on holistic approach to utilize all parts of Jatropha curcas fruit for energy*. Renewable Energy, 2008. **33**: p. 1868-1873.
21. Prasad, L., *Experimental Study on Gasification of Jatropha Shells in a Downdraft Open Top Gasifier*. Waste and Biomass Valorization, 2015. **6**: p. 117-122.
22. Martín, C., et al., *Fractional characterization of jatropha, neem, moringa, trisperma, castor and candlenut seeds as potential feedstocks for biodiesel production in Cuba*. Biomass and Bioenergy, 2010. **34**: p. 533-538.
23. García, R., *Characterization of Spanish biomass wastes for energy use*. Bioresource Technology, 2012. **103**: p. 249-258.
24. Suárez, D., Valencia, D., *Diseño a escala laboratorio del sistema de acondicionamiento de gas de síntesis para un motor de combustión interna*. Tesis para optar por el título de Ingeniero Mecánico, 2017. Universidad de América.
25. Mendiburu, A., et al., *Thermochemical equilibrium modeling of biomass downdraft gasifier: Stoichiometric models*. Energy, 2014. **66**: p. 189-201.