

Gasificación con aire en lecho fluidizado de los residuos sólidos del proceso industrial de la naranja

Air gasification in fluidized bed of solid residue the orange industrial process

Leonardo Aguiar-Trujillo^I, Francisco Márquez-Montesino^I, Boris Abel Ramos-Robaina^I,
Jesús Arauzo-Pérez^{II}, Alberto Gonzalo-Callejo^{II}, José Luís Sánchez-Cebrian^{II}

I. Universidad de Pinar del Río. Centro de Estudio de Energía y Tecnologías Sostenibles. Pinar del Río. Cuba.

Correo electrónico: leonardo@meca.upr.edu.cu

II. Universidad de Zaragoza, Departamento de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente. Zaragoza, España

Recibido: 15 de junio de 2012

Aceptado: 23 de noviembre de 2012.

Resumen

La industria procesadora de la naranja genera elevados volúmenes de residuos sólidos. Este residuo se ha utilizado en la alimentación animal y en procesos bioquímicos; pero no se ha aprovechado a través de la gasificación. El objetivo del trabajo fue determinar el aporte energético por medio del proceso de gasificación, realizándose estudios de los residuos sólidos de naranja, utilizando aire en reactor de lecho fluidizado burbujeante (variando la temperatura de gasificación, relación estequiométrica y altura del lecho). En el proceso se utilizó un diseño de experimento factorial completo de 2^k , valorando la influencia de las variables independientes y sus interacciones en las respuestas, con un grado de significación del 95 %. Se obtuvieron los parámetros para efectuar el proceso de gasificación de los residuos sólidos de naranja, obteniendo un gas de bajo poder calórico, próximo a $5046 \text{ kJ/m}^3\text{N}$, demostrando sus cualidades para su aprovechamiento energético.

Palabras claves: gasificación con aire, lecho fluidizado, residuo de naranja.

Abstract

The orange industrial process generates high volumes of solid residue. This residue has been used as complement in the animal feeding and biochemical processes; but it has not taken advantage through of the gasification process. The objective of the work was to determine the energy contribution by means of the gasification process, were carried out studies of the orange solid residue, using air in reactor of bubbling fluidized bed (varying the gasification temperature, air ratio and bed height). In the process a design of complete factorial experiment 2^k , was used, valuing the influence of the independent variables and its interactions in the answers, using a confidence level of 95 %. Were obtained the parameters to make the process of gasification of the orange solid residue, obtaining a gas of lower heating value, next to the $5046 \text{ kJ/m}^3\text{N}$, demonstrating their qualities for their energy use.

Key words: air gasification, fluidized bed, orange residue.

Introducción

Las industrias procesadoras de frutas y vegetales generan elevados volúmenes de residuos sólidos. Estos residuos son tratados para su posible empleo como complemento animal o para su eliminación debido a la influencia negativa que pueden ejercer sobre el medio ambiente por su elevado contenido de ácidos.

La industria procesadora de la naranja, para la obtención de jugos naturales o concentrados, no está exenta de esta problemática donde generan aproximadamente el 40-60% de su volumen total procesado como residuos sólidos húmedos. Este potencial de residuo, constituye un potencial de biomasa que puede ser aprovechado por las industrias como combustible, disminuir el consumo de combustibles fósiles, la emanación de gases contaminantes y de efecto invernadero, acorde con las políticas del país en el desarrollo de las energías renovables [1]

Dentro de las vías de reducción de los residuos generados en las industrias se encuentran los procesos termoquímicos de combustión, gasificación y pirólisis.

El aprovechamiento termoquímico de los residuos sólidos de naranja (**RSN**), se ha basado en estudios experimentales, vía pirólisis, [2-4]. Estos resultados hacen susceptible el aprovechamiento de estos residuos vía gasificación ya que se lograría eliminar el residuo y obtener un gas combustible de bajo poder calórico, el cual se puede utilizar en la industria reduciendo el consumo de combustible fósil que utiliza la misma en la generación de vapor, para lograr la concentración de los jugos.

El aprovechamiento con fines energéticos de residuos, a través del proceso de gasificación utilizando aire como agente fluidizante, esta determinado por el poder calórico inferior del gas resultante (PCIg) que se debe encontrar entre los 4 a 7 MJ/m³N, [5-7]. Este gas se puede emplear en turbinas, quemadores industriales y motores de combustión interna, con los tratamientos que requiera cada tecnología.

Dentro de los factores que determinan la calidad del gas resultante en los procesos de gasificación y su aprovechamiento energético se encuentra la temperatura que ocurre el proceso, que debe ser inferior a los 950 °C en biomazas y limitada superiormente por la temperatura de fusión de las cenizas, la relación estequiométrica del aire teórico necesario para la combustión completa varia del 20 al 50 %. En el proceso de gasificación en lecho fluidizado, la altura del lecho donde ocurren las reacciones de descomposición juega un papel importante favoreciendo las transformaciones de los residuos a gas [2, 3].

El aumento de la temperatura con que ocurre el proceso de gasificación favorece las reacciones de descomposición, elevando el rendimiento a gas y su poder calórico, este comportamiento es producto a que a las altas temperaturas el gas es más rico en hidrógeno y carbono, además se favorecen las reacciones de reformado con vapor y en seco (generación de H₂, CO e hidrocarburos ligeros), las reacciones de craqueo (formación de H₂, CO e hidrocarburos ligeros), metanación (formación de metano), *Boudouard* (formación de CO a partir del CO₂); mientras que el aumento de la relación estequiométrica diluye más el gas resultante y lo oxida, elevando su rendimiento, pero el gas aporta menor energía al disminuir su poder calórico (formación de CO₂ y H₂O) [5, 6, 8, 9]. La altura del lecho fluidizado eleva el tiempo de permanencia de la materia orgánica en el interior del reactor favoreciendo los choques efectivos de sus partículas, logrando su total conversión a gas [5, 6, 10].

En el proceso de gasificación los principales gases que se analizan son: H₂, CO, CO₂, CH₄, C₂H₄, C₂H₂, C₂H₆, H₂S [10-12], los cuales tributan al aprovechamiento energético, favoreciendo su presencia el poder calórico del gas resultante [13, 14]

En este trabajo determinaremos el aporte energético que se logra a través de la gasificación con aire de los residuos sólidos de naranja, en un reactor de lecho fluidizado, como vía de explotación y obtención de energía proveniente de estos residuos, la cual puede ser utilizada en la generación de vapor de las instalaciones y sustituir el consumo de combustible fósiles en las calderas.

Materiales y Métodos

La materia prima utilizada fueron los **RSN** del proceso de obtención de jugos concentrados. Los **RSN** se componen principalmente de corteza, hollejos y semillas de naranja. Los tratamientos realizados a la materia prima son el secado, la trituration y el tamizado de los mismos para ser utilizados en la investigación.

Los análisis realizados a la muestra son el análisis inmediato, elemental y la obtención del poder calórico, efectuados en el Instituto de Carboquímica (ICB) de Zaragoza, España y avalados por su Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Los resultados de los mismos se recogen en la tabla 1.

La arena (sílice, SiO_2) es el material inerte que se utiliza como coadyuvante para la fluidización del lecho. La arena utilizada en los experimentos se suministró por la empresa Sociedad de Minerales Silíceos, España, se recibe con un tamaño medio de partícula de 273 μm

Tabla 1. Análisis inmediato (% en masa), análisis elemental (% en masa) y poder calorífico de los RSN

Parámetro	Norma Analítica	Recibida	Seca
Análisis inmediato			
Humedad	ISO-589-1981	7,05	0,00
Cenizas	ISO-1171-1976	4,23	4,55
Volátiles	ISO-5623-1974	71,67	77,11
Carbono Fijo	Por diferencia	17,05	18,34
Análisis elemental			
Carbono (%)	Carlo Erba-1108	42,85	46,10
Hidrógeno*(%)	Carlo Erba-1108	5,90	5,50
Nitrógeno (%)	Carlo Erba-1108	1,62	1,74
Azufre (%)	Carlo Erba-1108	0,05	0,05
Oxígeno (%)	Por diferencia	49,58	46,61
Poder calorífico			
Poder calorífico superior (PCS_{mar} en kJ/kg)	ASTM D-3286-96	16962	18247
Poder calorífico inferior (PCI_{mar} en kJ/kg)		15509	17056

* El porcentaje de hidrógeno incluye el hidrógeno de la humedad.

Instalación experimental utilizada

Los experimentos de gasificación no catalítica en lecho fluidizado se realizaron en una planta de laboratorio como se muestra en la figura 1, ubicada en los laboratorios del grupo de procesos termoquímicos, perteneciente al Departamento de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente de la Universidad de Zaragoza.

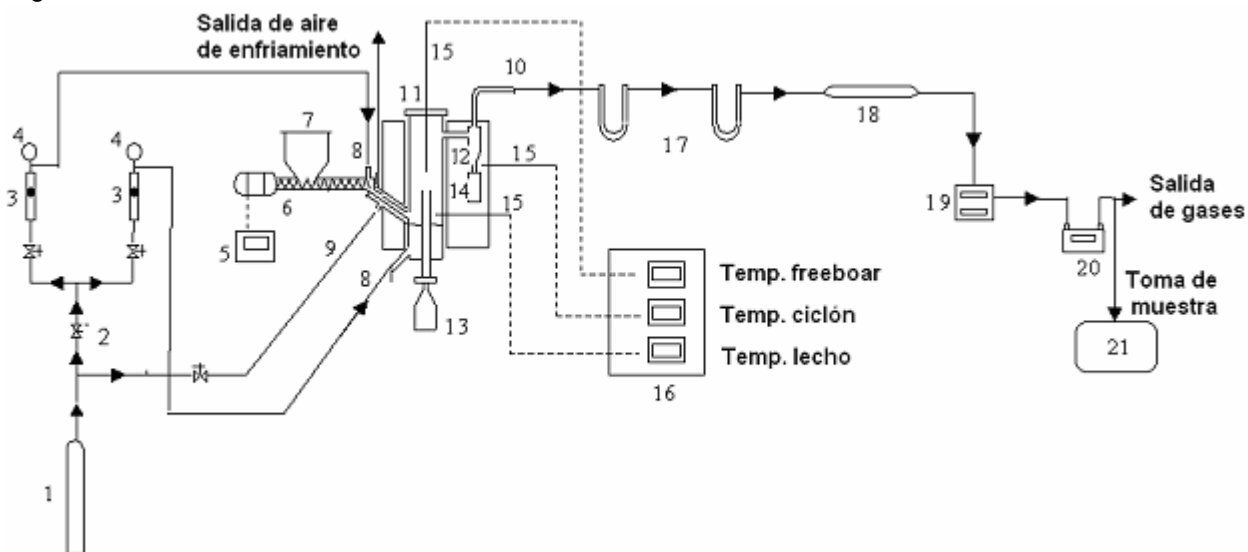


Fig. 1. Esquema de la instalación de la planta gasificación de lecho fluidizado:

1. Aire; 2. Controladores de flujo másico; 3. Rotámetros de aire; 4. Manómetros; 5. Variador de frecuencia; 6. Motor con tornillo sin fin; 7. Tolva de alimentación; 8. Alimentación de aire; 9. Aire de refrigeración; 10. Salida de gas; 11. Reactor; 12. Ciclón; 13. *Char pot.*; 14. Depósito de cenizas; 15. Termopar tipo K; 16. Control-indicador de temperatura; 17. Condensadores; 18. Filtro de algodón; 19. Analizador CO/CO_2 ; 20. Contador volumétrico; 21. Cromatógrafo portátil de gases (marca Agilent modelo 3000 A).

Procedimiento experimental

Para el diseño de experimento utilizado y el análisis de todos los resultados alcanzados, se utilizó el software *Design-Expert®* Versión 7, empleando un diseño factorial completo 2^k con el que se obtuvo el mínimo de 22 experimentos a realizar para valorar la influencia de las variables independientes en las respuestas analizadas y como salida un estudio estadístico de análisis de varianza (Anova), utilizando un grado de significación del 95 % ($\alpha = 0,05$), [10], para el cual se tomó en consideración:

- La distribución “F” de Fischer-Snedecor. $F_{(cada\ término)} > F_{tabulada}$. Prueba de significación.
- A partir del nivel de significación fijado ($\alpha = 0,05$), se valora la Probabilidad (P) de que el valor de la distribución “F” sea verdadero, $P < 0,05$, o sea se utiliza para decidir si la fuente de variación que se analiza ejerce un cambio significativo en la respuesta.
- Para la toma de decisión de las condiciones en que se deben efectuar los procesos en la región estudiada, se fundamenta en el criterio (Maximizar el resultado, minimizarlo, no tenerlo en cuenta o que se mantenga en el rango alcanzado) y en la importancia que se le brinda a cada respuesta alcanzada.
- Condiciones experimentales para efectuar la gasificación no catalítica con aire.

El reactor de lecho fluidizado opera a presión atmosférica, con un lecho inicial de 50 g de arena, estableciendo en la alimentación del sólido las siguientes proporciones de mezcla: por cada 100 gramos de residuos sólidos de naranja, se introducen 20 gramos de arena. La relación entre los caudales de residuos sólidos de naranja y aire alimentados define la relación estequiométrica (RE), parámetro básico en la gasificación con aire, para la cuál el caudal de aire de alimentación utilizado fue de 5 litros en condiciones normales en todos los experimentos:

$$RE = \frac{Q_{aire}}{AE * Q_{rmar}}$$

Donde:

Q_{aire} : caudal de aire alimentado ($m^3N/min.$).

Q_{rmar} : caudal de residuo sólido de naranja alimentado ($kg/min.$).

AE: aire estequiométrico (m^3N/kg).

El cálculo del aire estequiométrico se realizó teniendo en cuenta la composición elemental de la materia prima (tabla 1) y suponiendo la oxidación del C, H y S., de este modo se calcula el aire estequiométrico necesario para la combustión completa de un gramo de residuos sólidos de naranja, que resulta ser 5,25 litros en condiciones normales.

Los experimentos de gasificación en lecho fluidizado se realizaron a diferentes temperaturas en el reactor, alturas del lecho y relaciones estequiométricas (variables independientes del proceso), como se muestra a continuación:

- Temperatura de gasificación en el reactor (T): T = 700, 750 y 800 °C (variable numérica).
- Relación estequiométrica (RE): RE = de 25, 30 y 35 % (variable numérica).
- Altura del lecho (H): H = 150 y 300 mm (variable categórica).

El número total de experimentos al utilizar el diseño factorial completo y realizar dos réplicas de cada uno con tres puntos centrales por variable categórica resultó ser de 22 experimentos (tabla 2).

Tabla 2. Número total de experimentos a realizar

Experimento	Temperatura (°C)	Relación estequiométrica (%)	Altura del lecho (mm)
1	700	25	150
2	700	25	150
3	700	35	150
4	700	35	150
5	700	25	300
6	700	25	300
7	700	35	300
8	700	35	300
9	750	30	150
10	750	30	150
11	750	30	150
12	750	30	300
13	750	30	300
14	750	30	300
15	800	25	150
16	800	25	150
17	800	35	150
18	800	35	150
19	800	25	300
20	800	25	300
21	800	35	300
22	800	35	300

Como resultado del trabajo las respuestas que se valoran en el proceso de gasificación (figuras de la 2 a la 6) son: Rendimiento: a gas (R_{gas}), de alquitrán (R_{alq}), en % respecto a la alimentación realizada; Poder calórico inferior del gas obtenido: PCI_g ($\text{kJ/m}^3\text{N}$); Caracterización de los gases y Rendimiento energético del gas (Reg) en %.

En los experimentos se determinan los siguientes datos:

- Masa de condensables (agua y alquitranes): se halla por diferencia de pesada antes y después del experimento del equipo utilizado para la recogida de condensables y limpieza de gases (condensadores). La masa del agua se determina utilizando el método de Karl-Fischer titration, [15, 16] y el resto es considerado alquitrán.
- Masa de sólidos (cenizas + residuo carbonoso): a partir del material que se recoge en el lecho, char pot. y depósito inferior (pote central), y conociendo la masa de arena añadida, se pueden calcular por diferencia la masa de los sólidos procedentes de la gasificación.
- Volumen y composición de los gases productos: mediante cromatografía de gases se determinan las concentraciones puntuales de H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_2 , C_2H_6 , H_2S .
- PCI_g , Reg : a través de los gases que se obtienen en el proceso.

Resultados y discusión

El efecto provocado por la temperatura, la relación estequiométrica y la altura del lecho y sus interacciones sobre los productos del proceso de gasificación no catalítica, según el análisis de varianza (Anova) y el grado de confianza del 95 %, se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Efecto de los factores temperatura de gasificación (T), relación estequiométrica (RE), altura del lecho (H) y sus interacciones, en los productos de la gasificación.

Producto \ Parámetro	T (°C)	RE (%)	H (mm)	T – RE	RE – H	T – H	T-RE-H
Rgas (%)	+	+	+	+	+	+	–
Ralq (%)	–	–	–	+	+	+	+
PCIg(kJ/m ³ N))	+	–	+	–	+	–	+
Reg (%)	+	–	+	–	+	+	+
H ₂ (%)	+	–	+	–	+	+	–
CO (%)	+	–	+	–	+	+	+
CH ₄ (%)	+	–	+	–	+	–	+
CO ₂ (%)	–	+	–	+	–	+	+
C ₂ H ₄ (%)	+	–	+	–	+	–	+
C ₂ H ₆ (%)	–	–	–	+	+	+	+
C ₂ H ₂ (%)	+	–	–	–	+	–	+
H ₂ S (%)	–	+	+	+	+	–	+

+: El aumento del parámetro provoca un efecto positivo en el producto.

–: El aumento del parámetro provoca un efecto negativo en el producto.

Influencia de la temperatura de gasificación, relación estequiométrica y altura del lecho en los productos de la gasificación no catalítica.

1- El rendimiento a gas (Rgas) aumenta con el aumento de la T, de la RE y de la H. Este comportamiento se debe a que el aumento de la temperatura en el lecho aumenta la velocidad de las reacciones sólido-gas, aumenta la devolatilización de la materia prima en la zona de pirólisis y favorece las reacciones de craqueo y reformado de alquitranes, al igual que la gasificación del carbón obtenido en el proceso, favoreciendo la formación de gas. Además el aumento de la RE favorece la oxidación de la materia prima que se procesa, obteniendo como resultado el gas. Comportamientos similares en la variación de Rgas vs T, RE, H, han sido reportados por otros autores [9, 10, 12], con otras biomásas. El comportamiento se muestra en la figura 2.

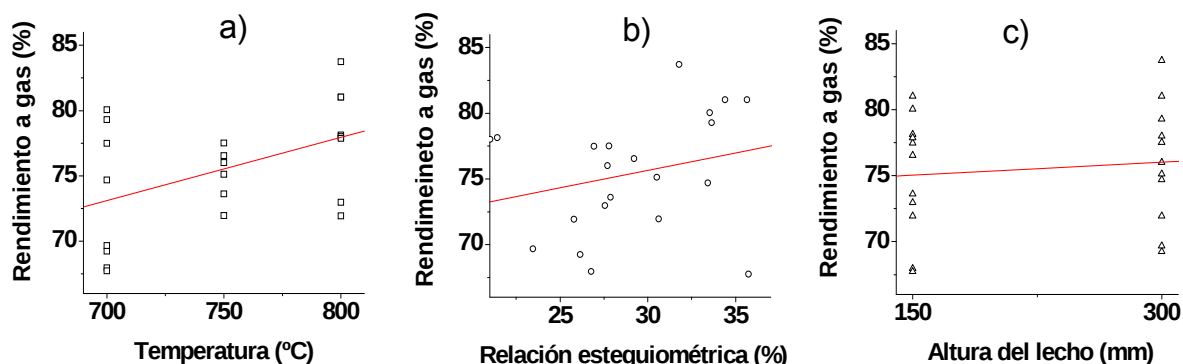


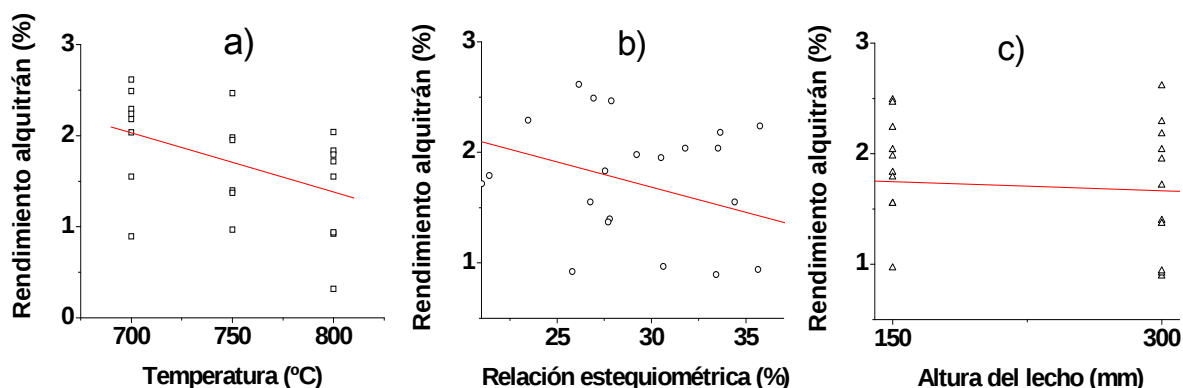
Fig. 2. Rendimiento a gas al variar: a) Temperatura, b) Relación estequiométrica y c) Altura del lecho.

Al analizar los resultados obtenidos estadísticamente, tabla 4, sobre el Rgas sólo ejerce influencia significativa la T, RE; no influyendo en este resultado la H y sus interacciones.

Tabla 4. Resultados estadísticos de análisis de varianza en gasificación no catalítica.

Parámetro	Parámetro estadístico	T (°C)	RE (%)	H (mm)	T – RE	T – H	RE – H	T-RE-H
Rgas (%)	Fcada parámetro	6,01	6,47	0,08	0,11	0,10	1,57	0,13
	Pcada parámetro	0,03	0,02	0,79	0,75	0,75	0,23	0,72
Ralq (%)	Fcada parámetro	4,59	1,55	0,00	0,00	0,04	0,00	2,96
	Pcada parámetro	0,06	0,24	0,93	0,94	0,85	0,99	0,11
PCIg (kJ/m³N)	Fcada parámetro	3,20	22,92	1,47	0,66	0,67	0,98	2,31
	Pcada parámetro	0,10	0,00	0,25	0,43	0,43	0,34	0,15
Reg (%)	Fcada parámetro	3,48	0,42	0,70	0,31	0,11	1,61	0,17
	Pcada parámetro	0,09	0,53	0,42	0,59	0,74	0,23	0,68

2- El rendimiento de alquitrán (Ralq) disminuye con el aumento de la T, la RE y la H, [12, 17] provocado porque el aumento de los factores T, RE, H favorecen las reacciones de craqueo, reformado y la oxidación de la materia prima por estar más diluido el gas. El comportamiento se puede ver en la figura 3. Variaciones similares de Rgas vs T, RE, H, se muestran en la literatura científica [18 - 20], con biomásas diferentes.

**Fig. 3.** Rendimiento de alquitrán al variar: a) Temperatura, b) Relación estequiométrica y c) Altura del lecho.

Al analizar los resultados obtenidos estadísticamente, tabla 4, sobre el Ralq no ejercen influencia significativa, ninguno de los factores T, RE, H, ni su interacción, por lo que su valor se puede tomar como la media de los experimentos realizados.

3- El poder calórico inferior del gas (PCIg) aumenta con el aumento de la T [10, 12, 18] y la H y disminuye al aumentar la RE [11, 13, 14]. Este comportamiento se produjo porque el gas, a altas temperaturas, es más rico en hidrógeno y carbono y con la menor de las relaciones estequiométricas se encuentra menos diluido, no favoreciendo la oxidación de la materia prima. Además el aumento de la temperatura, para todas las relaciones estequiométricas, favorece las reacciones de reformado con vapor (generación de H₂ y CO) y las reacciones de craqueo de vapor (formación de H₂ e hidrocarburos ligeros). Comportamientos similares en la variación del PCIg vs T, RE, H, lo obtienen [8, 9, 19] con diferentes biomásas. El comportamiento se puede ver en la figura 4.

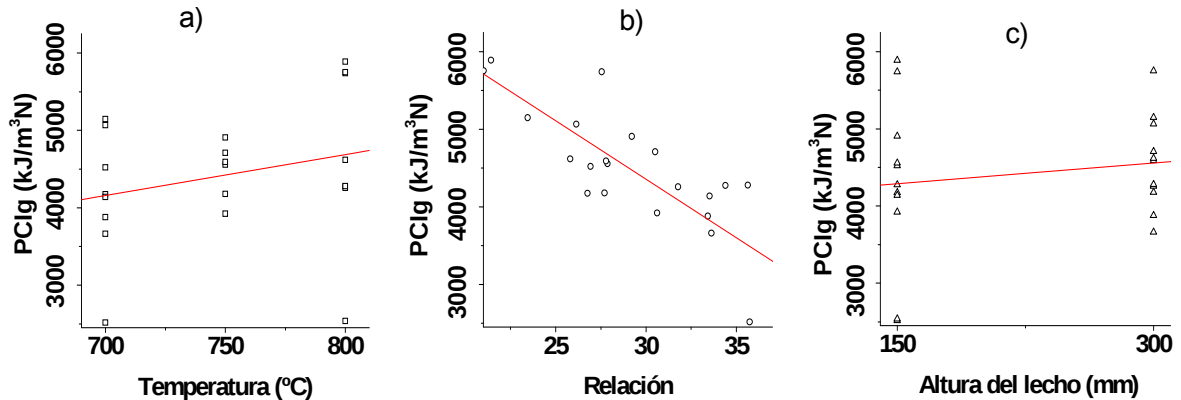


Fig. 4. Poder calorífico inferior del gas al variar: a) Temperatura, b) Relación estequiométrica y c) Altura del lecho

Al analizar los resultados obtenidos estadísticamente, tabla 4, sobre el PCIg sólo ejerce influencia significativa la RE; no influyendo en este resultado los factores T, H, ni la interacción de ellos.

Es posible el aprovechamiento de los residuos sólidos de naranja, del proceso de obtención de jugos concentrados, con fines energéticos a través del proceso de gasificación no catalítica, en lecho fluidizado utilizando aire como agente fluidizante porque se obtiene un gas con PCIg que varía entre 4 y 7 MJ/m³N de poder calorífico [5-7], que se puede emplear en turbinas, quemadores y motores de combustión interna.

4- El rendimiento energético a gas (Reg) aumenta al incrementarse la T y de la H; disminuyendo al aumentar la RE. Este comportamiento es producto a que el mismo depende directamente PCIg obtenido y de la biomasa utilizada y como se explicó anteriormente el PCIg aumenta con el aumento de la T y disminuye con el aumento de la RE. El comportamiento se muestra en la figura 5. Comportamientos similares en la variación de Reg vs T, RE, H, lo obtienen [8, 19] con diferentes biomásas.

$$Reg = \frac{Y_g \cdot PCI_g}{PCI_{Rnar}} \cdot 100$$

Depende de rendimiento específico a gas Y_g y del poder calorífico inferior del gas PCIg de los **RSN**.

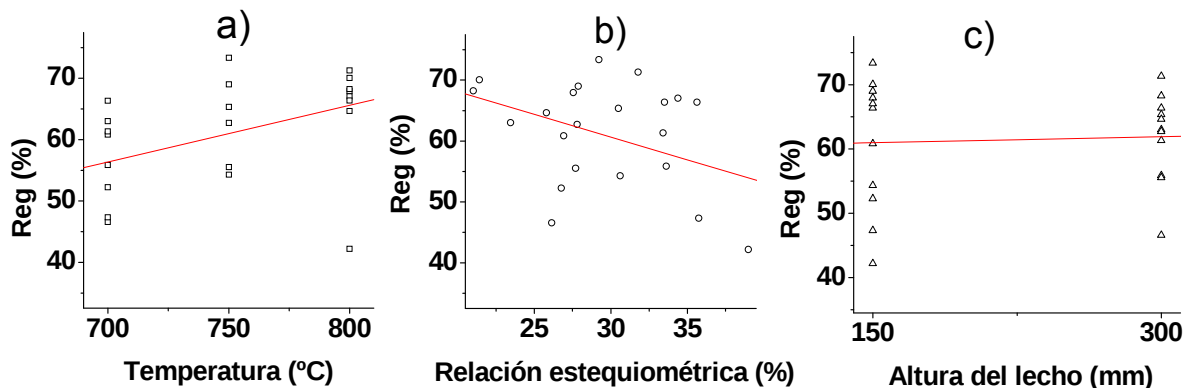
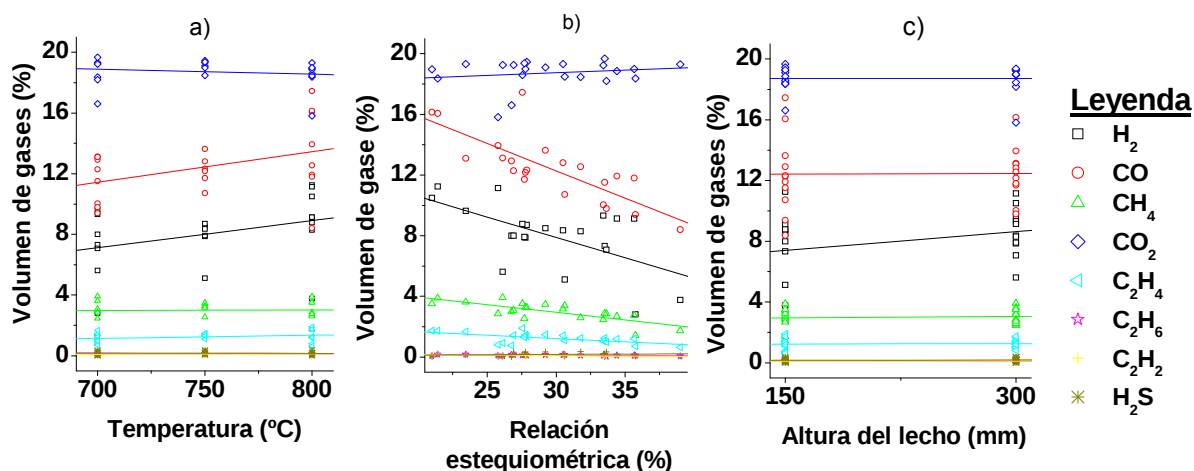


Fig. 5. Rendimiento energético a gas al variar: a) Temperatura, b) Relación estequiométrica y c) Altura del lecho

Al analizar los resultados obtenidos estadísticamente, presentados en la tabla 4, se observa que sobre el Reg no ejercen influencia significativa, ninguno de los factores T, RE, H y sus interacciones, por lo que su valor se puede tomar como la media de los experimentos.

5- La evolución de los gases obtenidos en el proceso se puede apreciar en la figura 6, este comportamiento está determinado por las principales reacciones que ocurren en el proceso (Boudouard, reformado en seco y con vapor, metanación, oxidación, craqueo y en los hidrocarburos). El comportamiento en los gases se corresponde con los obtenidos por otros autores [8, 11, 13, 17], utilizando diferentes biomásas.



Para lograr un aprovechamiento energético del gas, producto de la gasificación en lecho fluidizado de los **RSN**, donde se obtenga un elevado poder calórico del gas, rendimiento en el gas y rendimiento energético del gas, se debe trabajar a una temperatura de 800 °C, 25 % de relación estequiométrica y 300 mm de altura de lecho, para obtener en la región analizada los resultados que se muestran en la tabla 5:

Tabla 5. Resultados alcanzados al gasificar los **RSN** a una temperatura de 800 °C, 25 % de relación estequiométrica y 300 mm de altura de lecho

Rgas %	Ralq %	PCIg kJ/m ³ N	Reg %	H ₂ %	CO %	CH ₄ %	CO ₂ %	C ₂ H ₄ %	C ₂ H ₆ %	C ₂ H ₂ %	H ₂ S %
76,06	1,34	5046	66,81	10,50	14,62	3,12	17,60	1,26	0,10	0,12	0,06

Conclusiones

Como resultados del trabajo se puede concluir que:

- Es posible el aprovechamiento energético del gas, producto de la gasificación en lecho fluidizado de los residuos sólidos de naranja y su mejor resultado se obtiene a una temperatura de 800 °C, 25 % de relación estequiométrica y 300 mm de altura de lecho, alcanzando cerca de los 5046 kJ/m³N.
- El aumento de la temperatura favorece el empleo energético del gas, resultante de la gasificación en lecho fluidizado de los residuos sólidos de naranja, debido a que eleva su rendimiento y su poder calórico inferior respecto a la alimentación realizada.
- El aumento de la relación estequiométrica no favorece el uso energético del gas de la gasificación en lecho fluidizado de los residuos sólidos de naranja, debido a que eleva su rendimiento pero disminuye su poder calórico inferior respecto a la alimentación realizada producto a que el gas se encuentra más diluido.
- El alquitrán resultante del proceso de gasificación en lecho fluidizado, disminuye con el aumento de la temperatura, relación estequiométrica y altura del lecho.

Agradecimientos

Agradecemos al “Programa ALFA II, Thermochemical conversion of biomass into energy and fuels, Advanced training in bioenergy, número II-0444-FA. 2006” y al proyecto “Desarrollo de una planta de gasificación de fangos y compost, número 2006/572, de la Universidad de Zaragoza, España, 2007”, por financiar las estancias de estas investigaciones.

Referencias

1. Suárez, J. A., Beatón, P. A., Faxas, R. *et al.* "Energy, environment and development in Cuba". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012, vol. 16, nº 5, p. 2724–2731. ISSN 1364-0321 DOI 10.1016/j.rser.2012.02.023.
2. Aguiar, L., Márquez-Montesinos, F., Arauzo, J. *et al.* "Influence of temperature and particle size on the fixed bed pyrolysis of orange peel residues". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2008, vol. 83, nº 1, p. 124–130. ISSN 0165-2370. DOI 10.1016/j.jaap.2008.06.009
3. Aguiar-Trujillo, L., Marquez-Montesino, F., Ramos-Robaina, B. A. *et al.* "Rendimiento de los productos del proceso de pirólisis en lecho fijo de los residuos de naranja del proceso de obtención de jugos concentrados en la provincia de Pinar del Río, Cuba". *Ingeniería Mecánica*. 2009, vol. 12, nº. 3, p. 67-74. [Consultado el: 12 de febrero de 2012].
Disponible en: <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/index.php/revistaim/article/download/80/403>. ISSN 1815-5944.
4. Li, A. M., Li, X. D., Li, S. Q. *et al.* "Experimental studies on municipal solid waste pyrolysis in a laboratory-scale rotary kiln". *Energy*. 1999, vol. 24, nº 3, p. 209–218. ISSN 0360-5442, PII S03 60- 5442(98)00095-4.
5. Higman, Ch. y Van der Burgt, M. *Gasification*. Hardbound, 2003. 391 p. [Consultado el: octubre de 2008].
Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780750677073>. ISBN 13: 978-0-7506-7707-3
6. Kunii, D., y Levenspiel, O. *Fluidization Engineering*. Second edition, USA: Butterworth-Heinemann, 1991. p. 490. ISBN 0-409-90233-0.
7. Li, X. T., Grace, J. R., Lim, C. J. *et al.* "Biomass gasification in a circulating fluidized bed". *Biomass & Bioenergy*. 2004, vol. 26, nº 2, p. 171-193. ISSN 0961-9534. DOI 10.1016/S0961-9534(03)00084-9.
8. Xiao, R., Zhang, M., Jin, B. *et al.* "Air blown partial gasification of coal in a pilot plant pressurized spout-fluid bed reactor". *Fuel*. 2007, vol. 86, nº. 10-11, p. 1631–1640. ISSN 0016-2361, DOI 10.1016/j.fuel.2006.11.014.
9. Wan Ab Karim Ghani, W. A.; Alipour Moghadam, R., Mohd Salleh, M. A. *et al.* "Air Gasification of Agricultural Waste in a Fluidized Bed Gasifier: Hydrogen Production Performance". *Energies*. 2009, vol. 2, p. 258-268. ISSN 1996-1073, DOI 10.3390/en20200258
10. Manyà, J. J., Sanchez, J. L., Arauzo, J. *et al.* "Influence of gas residence time and air ratio on the air gasification of dried sewage sludge in a bubbling fluidised bed". *Fuel*. 2006, vol. 85, nº 14-15, p. 2027–2033. ISSN 0016-2361. DOI 10.1016/j.fuel.2006.04.008.
11. Vaezi, M., Passandideh-Fard, M., Moghiman, M. *et al.* "Gasification of heavy fuel oils: A thermochemical equilibrium approach". *Fuel*, 2011, vol. 90, nº 2, p. 878–885. ISSN 0016-2361. DOI 10.1016/j.fuel.2010.10.011.
12. Mohammed, M. A. A., Salmiaton, A., Wan Azlina, W. *et al.* "Air gasification of empty fruit bunch for hydrogen-rich gas production in a fluidized-bed reactor". *Energy Conversion and Management*, 2011, vol. 52, nº 2, p. 1555–1561. ISSN 0196-8904. DOI 10.1016/j.enconman.2010.10.023.
13. Subramanian, P., Sampathrajan, A. y Venkatachalam, P. "Fluidized bed gasification of select granular biomaterials". *Bioresource Technology*, 2011, vol. 102, nº 2, p. 1914–1920, ISSN 0960-8524, DOI 10.1016/j.biortech.2010.08.022.
14. Carlsson, P., Wiinikka, H., Marklund, M. *et al.* "Experimental investigation of an industrial scale black liquor gasifier. 1. The effect of reactor operation parameters on product gas composition". *Fuel*, 2010, vol. 89, nº 12, p. 4025–4034. ISSN 0016-2361, DOI 10.1016/j.fuel.2010.05.003.
15. Oasmaa, A. y Meier D. J. "Norms and standards for fast pyrolysis liquids 1. Round robin test". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2005, vol. 73, nº 2, p. 323-334. ISSN 0165-2370, DOI 10.1016/j.jaap.2005.03.003.
16. Aho, A., Kumar, N., Eränen, K., *et al.* "Catalytic pyrolysis of woody biomass in a fluidized bed reactor: Influence of the zeolite structure". *Fuel*. 2008, vol. 87, nº 12, p. 2493–2501. ISSN 1520-5029, DOI 10.1016/j.fuel.2008.02.015.
17. De Andrés, J. M., Narros Sierra, A. y Rodríguez, M. E. "Air-steam gasification of sewage sludge in a bubbling bed reactor: Effect of alumina as a primary catalyst". *Fuel Processing Technology*, 2011, vol. 92, nº 3, p. 433-440. ISSN 0378-3820. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.10.006>.

18. Aznar, M. P., Caballero, M. A., Sancho, J. A. *et al.* "Plastic waste elimination by co-gasification with coal and biomass in fluidized bed with air in pilot plant". *Fuel Processing Technology*. 2006, vol. 87, nº 5, p. 409 – 420. ISSN 0378-3820. DOI 10.1016/j.fuproc.2005.09.006
19. Cao, Y., Wang, Y., Riley, J. T. *et al.* "A novel biomass air gasification process for producing tar-free higher heating value fuel gas". *Fuel Processing Technology*. 2006, vol. 87, nº 4, p. 343 – 353. ISSN 0378-3820, DOI 10.1016/j.fuproc.2005.10.003.
20. Qin, Y., Feng, J. y Li, W. "Formation of tar and its characterization during air–steam gasification of sawdust in a fluidized bed reactor". *Fuel*. 2010, vol. 89, nº 7, p.1344–1347. ISSN 0016-2361, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2009.08.009>