

PIRÓLISIS AUTOTÉRMICA EN LECHO FLUIDIZADO DE ASERRÍN DE ALGARROBO

Ronoldy Faxas Esaclona*, José Antonio Suárez Rodríguez**, Pedro Aníbal Beatón**

*Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad de Oriente, **Centro de Investigación de Tecnología y Medio Ambiente (CITMA), Santiago de Cuba

La pirólisis oxidativa del aserrín de algarrobo, como una de las biomásas que se genera cada año en grandes cantidades, constituye uno de los procesos de investigación en desarrollo, producto de las ventajas que traería consigo la termoconversión de este residuo en productos útiles con importantes y diversas aplicaciones. La investigación fue realizada usando un nuevo aparato de lecho fluidizado, autotérmico, en el cual partículas de aserrín de algarrobo con diámetros menores de 4 mm, fueron alimentadas continuamente (10 kg/h) en el reactor de lecho fluidizado y utilizando aire como agente de fluidización. Los experimentos fueron realizados con tres diferentes factores de aire (FA): 0,4, 0,6 y 0,8 (definido como la razón aire / combustible real y el aire / combustible estequiométrico).

Los resultados indicaron que: (1) el aserrín de algarrobo puede ser pirolizado en condiciones de lecho fluidizado obteniéndose en todos los casos, líquidos, carbón y gases, (2) un incremento del factor de aire provoca que aumente la temperatura, contribuyendo al origen de reacciones secundarias y consecuentemente una disminución en el rendimiento de la fracción líquida, (3) el cálculo del balance de energía de la instalación resultó beneficioso para conocer la distribución del calor durante el proceso de termoconversión, (4) la caracterización de los líquidos en el rango estudiado, demostró que el factor de aire no tiene influencia notable en sus propiedades.

Palabras clave: algarrobo, autotérmico, biomasa, lecho fluidizado, pirólisis.

The oxidative pyrolysis of carob sawdust, like one of the biomass that generate every year in big quantities constitute one of the process of research in develop product of the advantages that bring with it the thermo conversion of this residue in useful product with importance and diversives applications. The research was realized using a new apparatus of fluidized bed, autothermic, particles of carob sawdust with less diameters of 4 mm were feeded continuously (10 kg/h) in fluidized bed with air. The experiments were realized with three different air factor (FA): 0,4; 0,6; 0,8 (defined as ratio of actual air flow rate to stoichiometric air flow rate).

The results indicate that (1) the carob sawdust can be pyrolysed in fluidized bed conditions where all the experiments liquids, gases and char, (2) the higher air factor promote high temperature and contribute to the secondary reactions, which lead to less liquid (3) the energy balance is very important in order to know the distribution of the energy in the installation during the thermoconversion process, (4) the characterization of the liquid products indicated that the air factor, in the range studied, does not have a notable influence in their properties.

Key words: autothermal, biomass, carob, fluidized bed, pyrolysis.

Introducción

Debido a las óptimas condiciones derivadas de su clima tropical, Cuba viene desarrollando una fuerte política de apoyo a las fuentes renovables de energía como fuentes alternativa a los combustibles fósiles para la producción de energía eléctrica, o productos de alto valor que reduzcan los altos costos de importación de otros países. Teniendo en cuenta su interés general por las

energías renovables ha crecido mucho en las últimas décadas las tecnologías de termoconversión aplicadas al aprovechamiento de la biomasa las cuales se están estudiando en profundidad en distintos centros de investigación y universidades del país.

La búsqueda del aprovechamiento de los residuos agrícolas ha desarrollado varios procesos termoquímicos para producir combustibles alternativos o productos de alto valor para industria química y farmacéutica. Entre las tecnologías de conversión termoquímica se encuentra la pirólisis la

que se muestra como una ruta prometedora y a sido bien identificada para la obtención de gases combustibles, líquidos (alquitrán o bio aceites) y carbón. Generalmente existen dos avances en este tipo de tecnología, un avance referido a la pirólisis convencional o tradicional, donde se puede maximizar el rendimiento del combustible gaseoso de acuerdo al régimen de operación: (1) alta temperatura, (2) bajos flujo de calentamiento y (3) prolongado tiempo de residencia del gas; o para incrementar la producción de carbón con (1) bajas temperatura y (2) bajos flujos de calentamiento.

Otro avance conocido como pirólisis rápida o ultrarrápida es para maximizar el rendimiento de los productos líquidos y depende de igual manera de las condiciones del proceso caracterizado por (1) altos flujos de calentamiento ($>100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$) y transferencia de masa, (2) diferentes tipos de biomasa y tamaños de partículas recomendados ($<4\text{ mm}$), (3) cuidadoso control de la temperatura (alrededor de $500\text{ }^{\circ}\text{C}$) y (4) rápido enfriamiento de los vapores para obtener los líquidos pirolíticos.

Para la realización de esta investigación el aserrín de algarrobo cubano (*Samanea saman*) ha sido seleccionado, por constituir uno de los residuos forestales más abundantes en zonas urbanas y montañosas de Cuba, que puede ser convertido en diferentes tipos de combustibles y materias primas orgánicas para la industria, según estudios realizados para el 2009 se generará solo en la provincia Santiago de Cuba alrededor de 112 t de aserrín de algarrobo. Otras características ventajosas de esta biomasa son las pequeñas dimensiones de las partículas ($dp < 4\text{ mm}$); poco contenido de humedad ($^{CHbh} < 15\%$); baja densidad aparente ($^{pbult} < 200\text{ kg}/\text{m}^3$), lo cual le ofrece excelentes cualidades para su manipulación y procesamiento mediante sistemas de cama fluidizada y de alimentación por tornillo sin fin.

Objetivo

El objetivo principal de este estudio fue evaluar la posibilidad de convertir el aserrín de algarrobo en líquido, carbón y gas bajo condiciones autotérmicas en un reactor de lecho fluidizado.

Pirólisis oxidativa de la biomasa en lecho fluidizado en régimen autotérmico

En la pirólisis de lecho fluidizado con aire (oxidativa), la biomasa experimenta una serie de cambios físicos y químicos, los cuales ocurren en lecho denso así como en la zona de separación libre (*freeboard*). Cuando las partículas caen inmersa en el lecho denso, el cual se encuentra a altas temperaturas ($400\text{-}600\text{ }^{\circ}\text{C}$), así como un intenso movimiento de ascenso en el centro de la cama y un descenso de estas, próximo a las paredes, comienzan a suceder transformaciones las cuales pueden ser descritas, de acuerdo al modelo de núcleo sin reaccionar, propuesto por Antal (1985), dando como resultado tres productos primarios líquidos, carbón y gases /1/. Estos productos primarios pueden sufrir reacciones secundarias, la oxidación de la fase gaseosa produce combustión con llama, y la oxidación de la fase sólida (carbón) produce la combustión sin llama. El calor liberado como resultado de las reacciones exotérmicas, es el responsable del régimen autotérmico del proceso /8/.

Teóricamente, en una atmósfera oxidante, la salida de compuestos orgánicos de alto y bajo peso molecular del reactor puede explicarse debido a que los lechos fluidizados se caracterizan por: (1) un rápido movimiento de las partículas que están siendo pirolizadas, (2) un gradiente de presión dentro de la columna, así como (3) un déficit de oxígeno molecular, que provoca que muchos de los volátiles logren su ascenso y alejamiento del lecho denso, lo que trae como consecuencia una rápida disminución de la temperatura de estos productos y que se conserven muchas de las especies químicas formadas.

Sección experimental

Material a pirolizar

Las muestras del aserrín de algarrobo fueron obtenidas del aserrío Martí ubicado en el centro urbano de la provincia Santiago de Cuba. Un total de 9 sacos, aproximadamente de 15 kg cada uno, fueron colectados y transportados al taller de la facultad de

Ingeniería Mecánica, para posteriormente ser utilizados en los experimentos. Para el análisis de las principales características de esta biomasa se tomaron de la muestra total, varias muestras aleatorias,

dicha características fueron determinadas en los diferentes laboratorios de la facultad de ingeniería química de la Universidad de Oriente y los principales resultados se muestran en la tabla 1.

Tabla 1
Principales características del aserrín de algarrobo

Características	Valor
Contenido de humedad (%)	13,76
Densidad aparente (kg/m ³)	199,33
Valor calórico bajo (MJ/kg)	18,77
Análisis elemental (% peso total, lhc ^a)	
C	49,15
H	5,93
N	0,18
O (por diferencia)	44,74
Análisis de tamaños (% peso total)	
≥4	0,53
4 - 2,8	1,25
2,8 - 2,0	1,8
2,0 - 1,4	7,55
1,4 - 1,0	21,03
1,0 - 0,71	62,55
0,71 - 0,5	41,93
0,5 - 0,355	26,75
< 0,355	13,93

^a lhc: libre de humedad y ceniza.

Aparato experimental

El pirolizador de lecho fluidizado que se presenta, se muestra en la figura 1. Los componentes principales del sistema son: soplador, micromanómetro, termómetros termoeléctricos, columna de fluidización, alimentador por doble tornillo sin fin, doble condensador ciclónico y una chimenea. El reactor fue construido con un cilindro de acero inoxidable de diámetro interno 200 mm y 2000 mm de altura. El distribuidor consiste en un plato de acero perforado con 431 agujeros (3 mm de diámetro y 6 mm el paso).

Para reducir las pérdidas de calor del sistema, la columna de fluidización es aislada mediante dos capas, una de concreto refractario y una segunda de lana de amianto, ambas con espesor de 40 mm. El flujo de aire del soplador es controlado por una válvula principal y medido por un micromanómetro vertical-inclinado (modelo MMN, Alemania), conectado a un tubo Pitot, antes de ser enviado a la columna. El perfil de temperaturas a lo largo de todo el sistema fue medido con 7 termómetros termoeléctricos XA (cromel-alumen) estos ter-

mómetros fueron conectados a un selector de puntos que a su vez se conectó a un termómetro digital modelo CIE 307.

Procedimiento experimental

Para realizar las corridas experimentales, inicialmente se procedió al proceso de encendido del reactor, en cual se utilizó 0.5 kg de carbón vegetal humedecido con 50 ml de combustible diesel, al que después de ser prendido, se le suministró una cantidad estequiométrica de aire utilizando un soplador /8/, tras lo cual, la temperatura comenzó a ascender hasta 850 °C en la zona del termopar 1, al cabo de 15 min. la temperatura comenzó a descender, en este instante se comenzó a alimentar biomasa con un flujo de 10 kg/h mediante el alimentador doble tornillo sin fin.

Una vez comenzada la alimentación se fijó el factor de aire deseado para cada corrida experimental, girando la válvula principal hasta obtener el flujo de aire correspondiente a cada caso, calibrada previamente la apertura de la válvula

con el micromanómetro vertical y el tubo de pitot. Las válvulas 1 y 2 se mantuvieron en todo momento en una posición constante, estando la válvula 1 abierta totalmente para permitir el paso de los volátiles hacia el segundo condensador, y la válvula 2 a medio recorrido de su apertura total para ofrecer cierta resistencia al escape de los gases al medio ambiente.

Una parte de los volátiles procedente de la columna de fluidización es condensada en el primer condensador acompañada de determinadas porciones de carbón de manera tal que el resto de los volátiles son separados de los gases incondensables en el segundo condensador, esta

segunda etapa de condensación se caracteriza por un intercambio de calor mas eficiente debido al previo enfriamiento de los gases de la primera etapa. Después del proceso de pirólisis los líquidos y el carbón fueron removidos y pesados y el peso del gas fue calculado por diferencia /7 y 8/.

La temperatura del rector fue mantenida entre 400 °C y 800 °C, logrado esto por el ajuste del factor de aire (FA). Los experimentos fueron realizados con factores de aire de 0,4; 0,6; y 0,8 respectivamente lo cual se logra variando la relación aire/combustible real introducido al reactor entre la relación aire/combustible estequiométrico. El tiempo de duración de cada experimento fue de una hora.

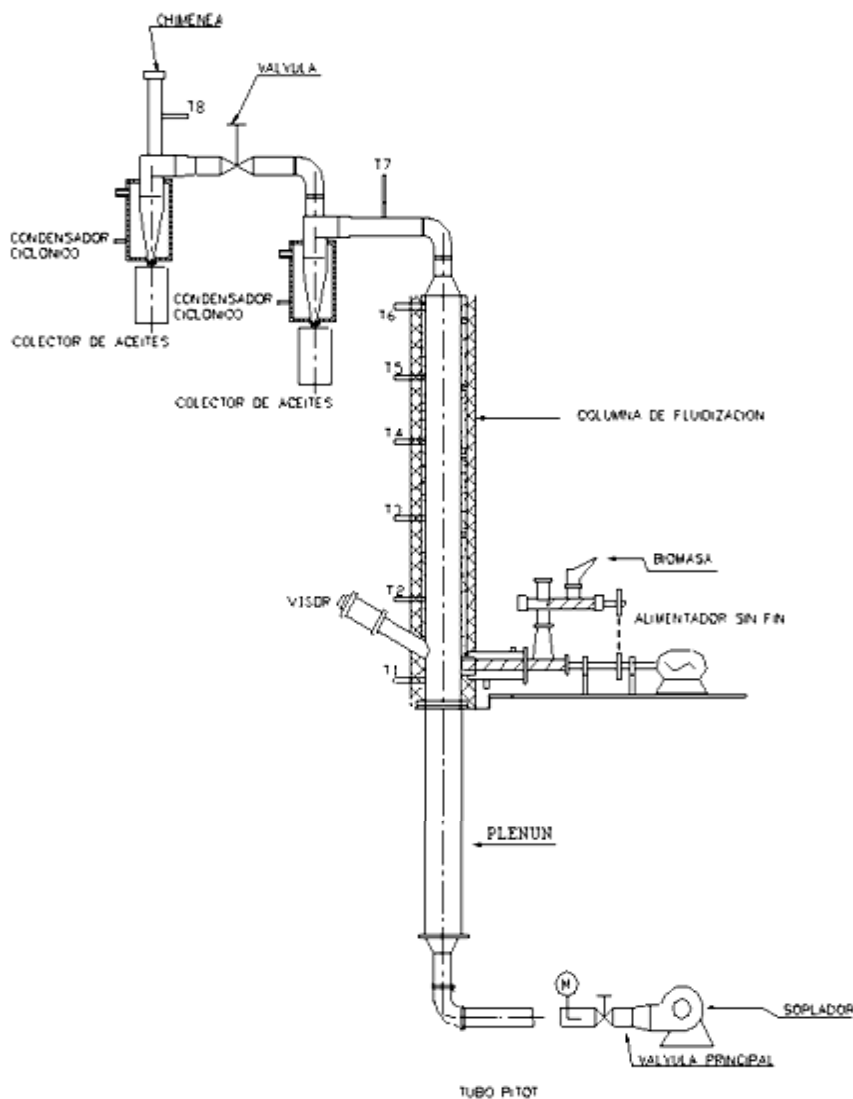


Fig. 1 Reactor de lecho fluidizado. Universidad de Oriente Facultad de Ingeniería Mecánica.

Análisis y discusión

Estudios realizados por diferentes investigadores /4, 8/ demostraron que durante la pirólisis oxidativa, el grado de combustión aumenta con el incremento del factor de aire. Los experimentos realizados de la pirólisis oxidativa del aserrín de algarrobo mostraron resultados similares; la temperatura dentro del reactor decreció continuamente en dirección a la salida confirmando la existencia de dos zonas: el lecho denso y la zona de separación libre (*freeboard*) donde la temperatura siempre es menor que la temperatura del lecho denso. La máxima temperatura en medio

del lecho denso fue de 699 °C y la de separación libre 145 °C, como era de esperar. En el medio del lecho denso, a mayor flujo de aire, la concentración del oxígeno en el medio de la columna de fluidización es alta, y podría reaccionar mejor con los volátiles y el carbón, propiciando reacciones exotérmicas y endotérmicas, generando el calor necesario para la desvolatilización de la biomasa y proporcionando el régimen autotérmico del proceso. En la figura 2 aparecen ploteadas las temperaturas promedio para diferentes factores de aire, a pesar de que también se realizaron experimentos para factor de aire 0,4 no se tuvo en cuenta, ya que la fluidización fue nula.

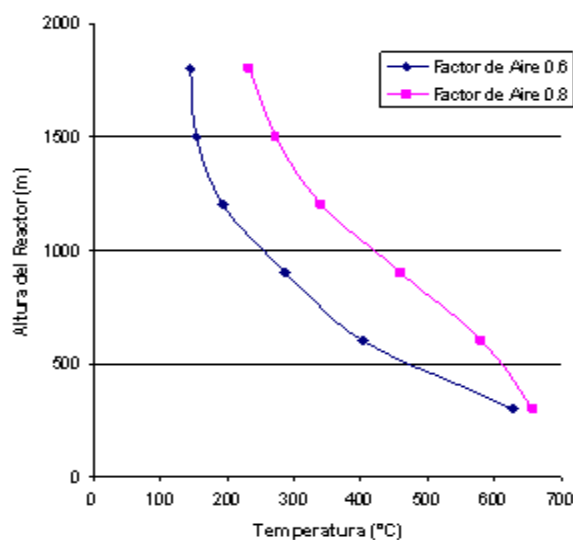


Fig. 2 Efecto del factor de aire en la temperatura de operación del reactor.

El cálculo del balance de energía de una instalación representa una herramienta importante para conocer la distribución del calor durante el proceso de termoconversión. El mismo fue basado en la medición del poder calórico de la biomasa, las pérdidas de calor a través de todas las paredes de la instalación, así como las energías acumuladas en los productos finales /2, 5, 8/. En la figura 3 aparecen reflejadas las principales pérdidas de energía, con ($FA = 8,0$), las máximas pérdidas

estuvieron concentradas en la entalpía de los gases de escape con un 44,93 % seguida por las pérdidas en el condensador ciclónico (1) con el 26,66 %. Otras pérdidas ocurren en el condensador (2) con el 16,0 %, la energía acumulada en el carbón con 9,3 % y la columna de fluidización con un 2,87 %. En menores proporciones les siguen las pérdidas en los tubos de la red (0,48 %), las pérdidas en la chimenea (0,41 %) y la energía almacenada en el alquitrán (0,33 %), respectivamente.

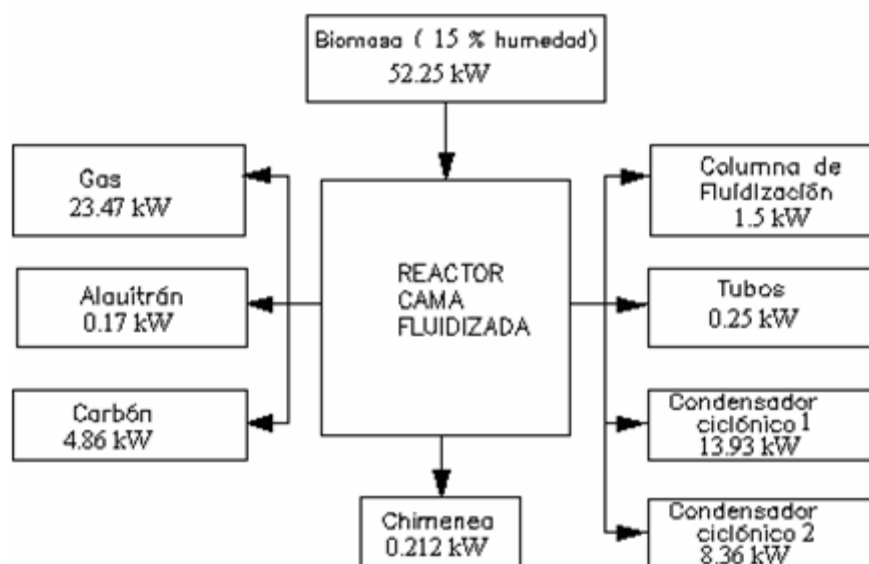


Fig. 3 Balance de energía del reactor de cama fluidizada.

En este estudio el rendimiento de los líquidos (η_l) creció del 3,33 % al 21,84 %, con la disminución del factor de aire de 0,8 a 0,6, como se esperaba, debido a una disminución de la oxidación del material volátil liberado por las partículas de aserrín. El rendimiento de carbón (η_c) se incrementó desde 0,8 % hasta 8,8%, con el incremento del factor de aire de 0,6 a 0,8, esto puede ser debido a que con el aumento del flujo de aire, las partículas de carbón podrían ser arrastradas fuera de la columna de fluidización,

antes de completar la desvolatilización. El rendimiento de gas (η_g) creció con el factor de aire de 77,36 % ($FA=0,6$) a 87,87 % ($FA=0,8$), sugiriendo que el alquitrán fue convirtiéndose, por el craqueo térmico, en compuestos gaseosos; similares resultados fueron obtenidos por Suárez y Beatón (2004) en el estudio de la pirólisis de lecho fluidizado del aserrín de pino. Los resultados de la influencia del factor de aire en los rendimientos de los productos del proceso de pirólisis son mostrados en la en tabla 2.

Tabla 2
Resultados de los experimentos para diferentes factores de aire

	Factor de Aire (Adimensional)		
	0,4	0,6	0,8
Flujo de Biomasa (kg/h)	10	10	10
Velocidad del Aire (m/s)	16,84	25,26	33,68
Temperatura del lecho Denso ^a (°C)	-	435	600
Temperatura a la Salida Libre ^b (°C)	-	170	360
Rendimientos (wt %)			
Líquidos	-	21,84	3,33
Carbón	-	0,8	8,80
Gases	-	77,36	87,87
Características de los líquidos			
Densidad (20 °C g/cm ³)	-	1,04	1,01
pH	-	3,80	4,2

^a Promedio de las temperaturas registradas en los termopares 1, 2 y 3

^b Promedio de las temperaturas registradas en los de termopares 4, 5 y 6

El estudio de la fracción líquida que se muestra en la tabla 2, mostró que la densidad para ambos casos es ligeramente mayor que la del agua destilada y con un comportamiento ácido. Estos valores de densidad y pH están en el rango reportados por diferentes autores /3, 8/.

La determinación de estas propiedades sirvió para encontrar aplicación como desinfectante por la similitud que tiene sus propiedades al alquitrán de hulla. Este líquido de pirólisis es tan útil como el alquitrán, su empleo en el mundo de los desinfectantes como la creolina, aromatizantes, lo distinguen por su olor característico, buena apariencia, líquido sin sedimento, propiedades deterativas, abrasivas y fenólicas. Los líquidos se caracterizaron por tener un color marrón oscuro con fuerte olor a humo.

Conclusiones

1. La obtención de los líquidos piroleñosos es posible en el reactor de lecho fluidizado, utilizando como biomasa aserrín de algarrobo, sin la necesidad de una fuente de calentamiento externa y usando aire como agente de fluidización.
2. El máximo rendimiento de líquido ha sido de 21,84 %, con factor de aire ($FA = 0,6$) obteniéndose a su vez valores de rendimiento de 77,36 % en los gases y solo 0,8 % para el carbón.
3. Experimentos con factores de aire ($FA = 0,4$), no fueron posibles de realizar, debido a la insuficiente velocidad del aire, en este rango, por lo cual no se logro la fluidización de las partículas de la biomasa en la columna, ocasionando esto la obstrucción de los agujeros del plato distribuidor al acumularse biomasa en el mismo, y por ende el posterior auto apagado del equipo
4. Las máximas pérdidas estuvieron concentradas en la entalpía de los gases de escape con un 44,93 % seguida por las pérdidas en el condensador ciclónico (1) con el 26,66 %.
5. El líquido obtenido se caracteriza por tener un color marrón oscuro con fuerte olor a humo, con propiedades físicas y químicas en el rango reportado por otros autores
6. El proceso de pirólisis en lecho fluidizado se realiza de una forma controlada y a temperatura relativamente bajas lo que evita la formación de (NOx) y la fuga de sustancias contaminantes, por lo cual es considerada una tecnología con menos riesgos par la salud del hombre que la quema descontrolada de la biomasa en plazoletas, la cual ha sido tradicionalmente usada para eliminar estos bioresiduos.

Bibliografía

1. Antal, M.: "Mathematical Modelling of Biomass Pyrolysis Phenomena ". Fuel, 64, 1985, p. 1483-1486.
2. Beckman, D. y R. Graham.: "Economic Assessment of a Wood Fast Pyrolysis Plant". In A.V Bridgwater (ed.). Advances in Thermochemical Biomass Conversion, págs. 1314-1324, 1994.
3. Bridgwater, A.: PyNe Newsletter, Issue 7, March, Guide 1, Ed. Aston University, UK, págs. I-V, 1999.
4. Ergüdenler, A., Ghaly, A., Hamdullahpur, F. y A. Al-Taweel.: "Mathematical Modeling of a Fluidized Bed Straw Gasifier: Part III- Model Verification". Energy Sources, 19, págs.1099-1121, 1997.
5. Pavlov, K., Romankov, P. y A. Noskov.: "Problemas y Ejemplos para el Curso de Operaciones Básicas y Aparatos en Tecnología Química". Editorial Mir, Moscú, 1981.
6. Predel, M. y W. Kamisky.: "Pyrolysis of Rape-Seed in a Fluidized Bed Reactor". Bioresource Technology, 66, págs.113-117, 1998.
7. Sensöz, S., Angin, D. y S. Yorgun.: "Influence of Particle Size on the Pyrolysis of Rapeseed (Brassica Napus L.): Fuel Properties of Bio-Oil". Biomass & Bioenergy, 23, págs. 271-279, 2000.
8. Suárez, J., Beatón, P., Grimm, A. y R. Zanzi.: "Autothermal Fluidized Bed Pyrolysis of Cuban Pine Sawdust". Energy Sources, 2004.
9. Tsai, T., Lee, M. y M. Chang.: "Fast pyrolysis of rice straw, sugarcane bagasse and coconut shell in an induction-heating reactor". Journal of analytical and applied pyrolysis, 76, págs.230-237, 2006.