

REACTORES EN LECHO FLUIDIZADO

Ronoldy Faxas Esaclona, José Antonio Suárez Rodríguez, Pedro Aníbal Beatón
Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad de Oriente, Centro de Investigación de Energía Solar (CIES), Centro de Investigación de Tecnología y Medio Ambiente (CITMA). Santiago de Cuba, Delegación Provincial de Investigación de Tecnología y Medio Ambiente, Santiago de Cuba

La producción de combustibles líquidos como resultado del proceso de pirólisis a partir de desechos agroforestales y otros residuos industriales se ha venido desarrollando con más ímpetu en los últimos 10 años. Los bio aceites o bio combustibles como bien se les conoce, están siendo sustitutos alternativos de los combustibles fósiles, encontrando aplicación en calderas, hornos, motores diesel y turbinas de gas, son productos de alto valor para el mercado de la industria química y farmacológica; son más fáciles de almacenar, manipular y transportar que la materia prima natural. Poseen mayor densidad energética y volumétrica, y sus productos secundarios frente a los del petróleo son más aceptados ambientalmente, debido a su escaso contenido de nitrógeno y azufre. Diversos equipos y aparatos se han diseñado para la obtención de estos líquidos, destacándose los reactores de lecho fluidizado, debido a que estos presentan diferentes ventajas; tales como: estructura simple, utilización de diferentes diámetros de partículas, fácil operación, fácil escalado y altos flujos de transferencia de calor y masa. El objetivo de este trabajo es exponer el proceso de pirólisis rápida para la producción de líquidos piroleñosos, con particular interés en las configuraciones de los reactores de lecho fluidizado.

Palabras clave: pirólisis, desechos, bio aceites, lecho fluidizado.

In the last 10 years, the production of liquid fuel as result of pyrolysis process from forest residues and other industry residues has been development with more strength. The biol-oil or bio-fuel like well know, are alternative substitutes of fossil fuel, finding application in boilers, furnace, diesel engine and gas turbine. Are products with a high value for the market of chemistry and pharmacology industries. The other hand they are easier to handle, to transport and to store than the natural raw material. The products of pyrolysis have high energy and volumety density and their secondary products in relation with the oil, are more environmental accepted because of its limited of nitrogen and sulphur. Different equipment and technology has been design for obtainment of liquid, focus attention in the fluidized bed reactor. This technology present different advantage as well as: simple structure, utilization of different diameter of particle, easy operation, scale and high flows of transfer of hot and mass. The main objective of this paper is explaining the pyrolysis process for liquid production, with interesting attention in the fluidized bed reactor configuration.

Key words: pyrolysis, residues, biol-oil, fluidized bed.

Introducción

Uno de los problemas más serios que tradicionalmente enfrentan las industrias agro forestales en Cuba y en el mundo, esta relacionado con las enormes cantidades de biomásas que se producen cada año, sin ninguna utilidad energética, y que al ser quemados para su eliminación, provocan serios problemas medio ambientales. Numerosos países, han logrado el desarrollo de equipos y aparatos capaces de convertir estos residuos en productos útiles y de mayor valor económico, a través de procesos de conversión termoquímica. La pirólisis ha sido una vía para darle solución a las enormes cantidades de residuos que genera la industria agroforestal y otras

industrias. Generalmente estos residuos de origen orgánico, destacándose el bagazo y la paja de caña, las cáscaras de arroz, café, el aserrín y las astillas de madera; entre otros, han sido objeto de estudio en el proceso de pirólisis para una mejor comprensión de la degradación térmica que ocurre en ellas /1, 6, 8/.

La pirólisis es un proceso que tiene muchos años de existencia y es bien conocida por la obtención de carbón vegetal. Hoy en día la pirólisis se presenta en tres subclases: pirólisis convencional, pirólisis rápida y pirólisis ultrarrápida. La diferencia entre ellas viene dada por cuatro aspectos fundamentales: (1) temperatura a la que ocurre el proceso, (2) flujo de calentamiento, (3) tiempo de residencia de los sólidos y (4) tamaño

de partícula. La pirólisis rápida ha logrado gran atención con respecto a la convencional por tener mayor rendimiento en productos líquidos y a pesar de estar por debajo de la pirólisis ultrarrápida en algunos aspectos, es aceptable, debido a que el proceso es más estable y puede controlarse cuidadosamente para dar altos rendimientos del producto líquido, además de que su tecnología es mucho más barata, a diferencia de su homóloga superior que es compleja y muy costosa /5, 9/.

Estudios realizados han demostrado que toda materia orgánica (biomasa) a temperaturas superiores a los 200 °C, se degrada térmicamente en productos sólidos (carbón vegetal), líquidos y gases como productos primarios. La pirólisis rápida de la biomasa es un proceso que ocurre a temperaturas alrededor de los 400-600 °C en presencia de un gas inerte o limitadas cantidades de aire. Producto de la descomposición térmica de la biomasa (hemicelulosa, celulosa y la lignina) aparecen vapores condensables que dan lugar a un líquido de color marrón oscuro formado por dos fases; una fase acuosa de bajo peso molecular y otra fase no acuosa de alto peso molecular (bio aceites), con un poder calórico (17 MJ/kg) alrededor de la mitad del aceite combustible convencional (40-42 MJ/kg). La calidad y proporción de los productos viene dado por el flujo de calentamiento, temperatura del proceso, tiempo de residencia de los productos, tamaño de la partícula, contenido de humedad y cenizas, presencia de aire, oxígeno u otro gas inerte, el tipo de catalizador, la presión y la geometría del reactor /3, 6/.

Las tecnologías de pirólisis han alcanzado alto grado de desarrollo en cuanto al diseño de los reactores, buscando altos flujos de calor, moderadas temperaturas, pequeños tiempos de residencia de los vapores y bajos costos de producción, dando lugar al surgimiento de cinco tipos de procesos: (1) Proceso de pirólisis en cama fluidizada, (2) Proceso de pirólisis por abrasión, (3) Proceso de pirólisis de flujo arrastrado, (4) Proceso de pirólisis en cono rotatorio, y (5) Proceso de pirólisis al vacío. De todos el proceso de pirólisis en lecho fluidizado ha despertado gran interés debido a que estos presentan diferentes ventajas; tales como: estructura simple, utilización de diferentes diámetros de partículas, fácil operación, fácil escalado, altos flujos de transferencia de calor y masa y altos rendimientos de los productos líquidos /9, 2/.

Desarrollo

Reactor de pirólisis en lecho fluidizado

El proceso de pirólisis viene dado por una serie de operaciones y depende en gran medida del diseño de experimento que se realice, para un mejor desempeño del reactor y de acuerdo a los resultados que se quieran obtener. En la figura 1 se muestra el esquema del proceso de pirólisis en lecho fluidizado, así como, las diferentes sistemas que lo componen.

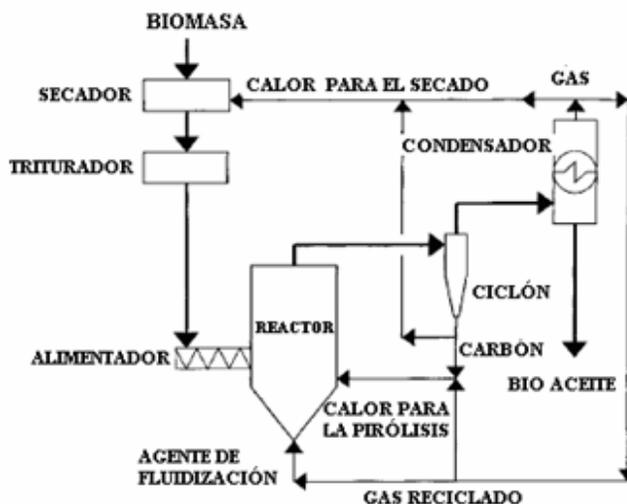


Fig. 1 Esquema del proceso de pirólisis en lecho fluidizado.

Estado actual de los reactores de pirólisis en lecho fluidizado

Los reactores de pirólisis de lecho fluidizado para la obtención de bio aceite han sido difundidos por todo el mundo, con disímiles diseños

en lo que respecta a agregados y elementos que lo componen, pero en esencia, todos se basan en el mismo principio. En la tabla 1 aparecen registrados las distintas organizaciones que han llevado a cabo este proceso y el estado actual en que se encuentran.

Tabla 1
Organizaciones que han llevado a cabo el procesos de pirólisis en reactores de lecho fluidizado para la obtención de bio aceites /4, 11, 12/

| Organización | País | Flujo de biomasa (kg/h) | Estado Actual |
|---------------------------------------|-----------|-------------------------|-------------------|
| Dynamotive | Canadá | 1500 | Diseño |
| Unión Fenosa/Waterloo | España | 200 | Operación |
| University of Hamburgo | Alemania | 50 | Operación |
| Dynamotive | Canadá | 20 | Operación |
| Universidad de Zhejiang | China | 20 | Operación |
| RTI | Canadá | 20 | Operación |
| Unversidad de Oriente | Cuba | 10 | Operación |
| BFH/IWC | Alemania | 6 | Operación |
| INETI | Portugal | 5 | Operación |
| Universidad de Zhejiang | China | 3 | Operación |
| RTI | Canadá | 3 | Desmantelada |
| University of Waterloo | Canadá | 3 | Moved to RTI 1995 |
| University of Aston | UK | 2 | Operación |
| BFH (IWC) | Alemania | <1 | Operación |
| CPERI | Grecia | <1 | Desmantelada |
| NREL | USA | <1 | Operación |
| RTI | Canadá | <1 | Operación |
| Universidad de Aston | UK | <1 | Operación |
| Universidad de Leeds | UK | <1 | Operación |
| Universidad de Oldenburg | Alemania | <1 | Operación |
| Universidad de Tecnologia | Malasia | <1 | Operación |
| Universidad de Santiago de Compostela | España | <1 | Diseño |
| Universidad de Sassari | Italia | <1 | Operación |
| Universidad de Stuttgart(ZSW) | Alemania | <1 | Apagada |
| Universidad de Zaragoza | España | <1 | Operación |
| VTT | Finlandia | <1 | Operación |

Descripción del proceso de pirólisis

En sus inicios la biomasa debe ser recolectada y almacenada evitando la interacción con el medio y la posible contaminación. Para grandes reactores en los cuales la capacidad supera los 200 kg/h, el empleo de silos es conveniente, éstos son llenados con transportadores neumáticos. Para un segundo paso le sigue el proceso de secado lo cual elimina gran cantidad de humedad de la biomasa reduciendo considerablemente los costos de la instalación, ya que se efectúa por el calor

latente que lleva el gas incondensable, producto del mismo proceso. La clasificación del material es de vital importancia en el proceso, referido concretamente a la selección del tamaño de partícula con que se va a trabajar, estudios realizados demuestran que para tamaños de partícula en el orden de 2-4 mm favorece el proceso de fluidización, aunque plantean que para una mejor fluidización es conveniente utilizar tamaños de partículas uniformes /10/. Diversos diseños adjuntan, antes de la entrada de la materia prima orgánica al reactor, un triturador, el cual es capaz

de ajustar el tamaño de partícula para el cual fue diseñado el equipo, evitando una incorrecta fluidización. La biomasa es introducida al reactor por un sistema de alimentación que difiere de muchos aspectos para los diseñadores (válvula rotatoria, doble tornillo sin fin, etcétera). Por la parte inferior del reactor es introducido el agente de fluidización (aire, gas inerte), propiciando la reacciones del proceso. La materia orgánica, al estar en contacto con el agente de fluidización, se degrada térmicamente y va perdiendo peso, en este proceso ocurren dos fenómenos importantes, la formación de pequeñas partículas de carbón y cenizas y la formación de vapores y gases. Los carbones y la ceniza arrastrados por la corriente del agente de fluidización son extraídos en colector de partículas y los vapores son condensados obteniéndose los líquidos combustibles. Los gases incondensables son incorporados al reactor y al sistema de secado.

Aparato experimental

El pirolizador de lecho fluidizado que se presenta, se muestra en la figura 2. 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. La composición de los gases será determinada por un analizador de gases a la salida del segundo condensador. El perfil de temperaturas a lo largo de todo el sistema será medido con 8 termómetros termoeléctricos tipo XK (cromel-copel), con la excepción del número uno (T1) que es del tipo XA (cromel-alumen).

Procedimiento experimental

Una vez alcanzado el régimen estacionario (~ 30 minutos después del inicio de la alimentación), el cual se caracterizará por una estabilidad o ligeras fluctuaciones en las temperaturas de operación del reactor, las válvula 1 y 2 serán abiertas, con el objetivo de permitir el paso de los volátiles hacia los condensadores. La temperatura del reactor puede ser mantenida entre 600 °C – 1000 °C, y será logrado por el ajuste del factor de aire (*FA*), definido como la razón de aire/combustible real introducido al reactor, y el aire/combustible estequiométrico/11/, y se expresa por medio de la ecuación (1):

$$FA = \frac{Va/Fb}{VA} \quad (1)$$

donde:

- FA*- factor de aire (adimensional)
- Va*- flujo volumétrico de aire real (m³/h)
- Fb*- flujo de biomasa (kg/h)
- VA*- Volumen estequiométrico de aire (m³/kg)

Este proceso de pirólisis puede ser descrito como un sistema de combustión parcial autotérmico.

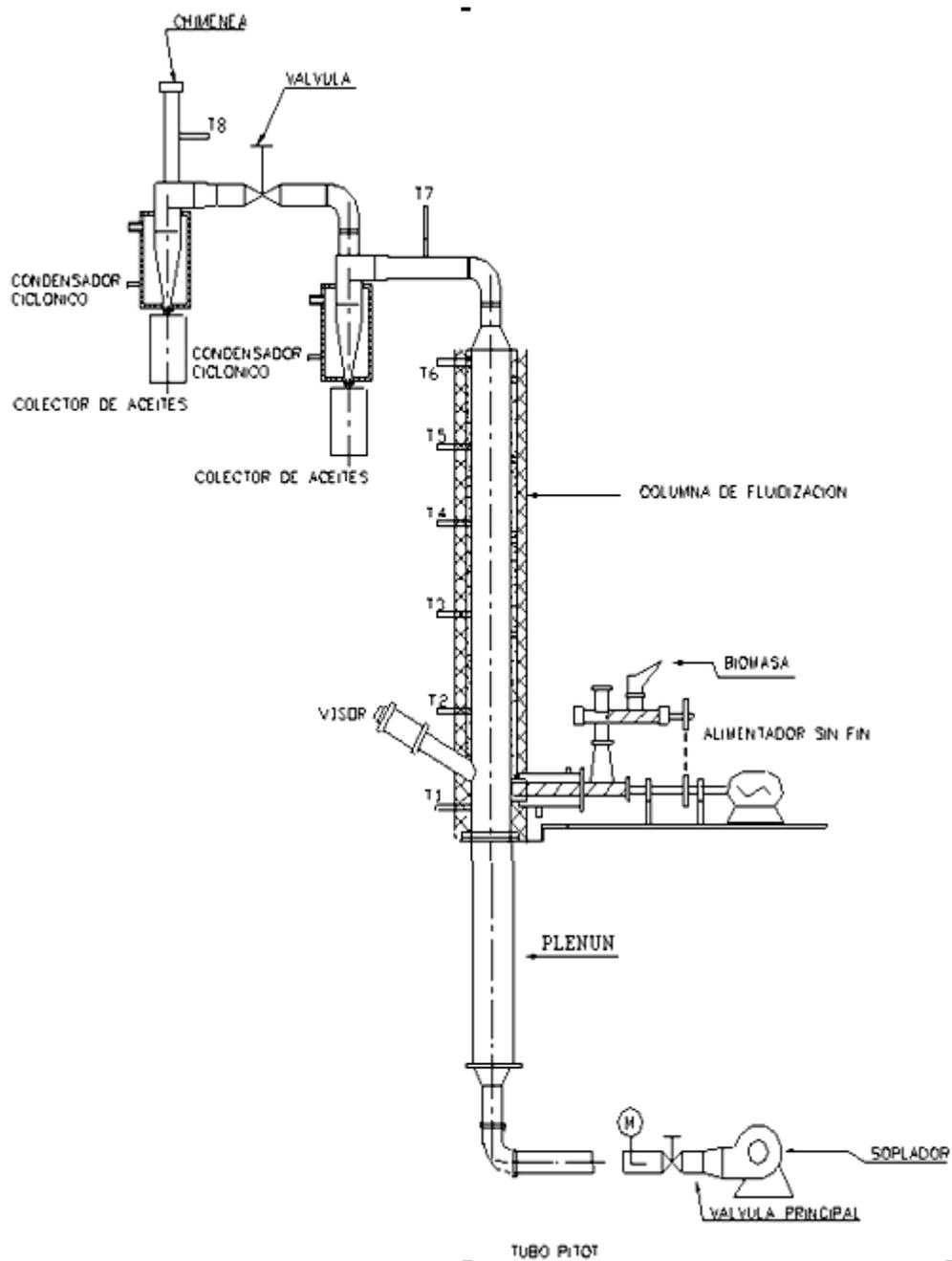


Fig. 2 Representación esquemática del reactor de Lecho Fluidizado. Universidad de Oriente Facultad de Ingeniería Mecánica.

Los productos pasarán a través del primer condensador ciclónico donde será recolectado parte de los gases condensables y pequeñas porciones de carbón, una segunda recolección ocurrirá cuando los vapores remanentes de la corriente de gas y no condensados pasen a través del segundo condensador ciclónico, etapa final donde estos gases remanentes son condensados y separados de los gases no condensables, se puede definir este proceso de recolección en dos etapas, la primera se comportará como un previo enfriamiento de los vapores del proceso dado que el primer condensador está muy próximo a la columna de fluidización, donde las temperaturas son mayores y la segunda etapa o final es donde se prevé que exista un mayor intercambio de calor ya que las temperaturas habrán disminuido considerablemente y por ende, la transferencia de calor será mas efectiva y provocará un aumento del rendimiento de los productos líquidos.

Suárez en el 2004 comprobó una vez más la relación que existe entre la temperatura y el rendimiento de los productos líquidos en el proceso de pirólisis, concluyó que un aumento del factor de aire (*FA*) de 0.4-2 intensificó las reacciones de combustión y por tanto las temperaturas alcanzaron valores de hasta 900 oC con un rendimiento (η) de los productos líquidos del 2 % para factor de aire 2, mientras que para factor de aire 0.4 se obtuvieron mejores resultados, temperaturas máximas en el orden de 600 oC y rendimiento de los productos líquidos de 19.5 %.

Después de la pirólisis, los líquidos y el carbón serán removidos y pesados, y el peso del gas será calculado por diferencia /7/. Los experimentos serán hechos con diferentes factores de aire (*FA*), lo cual se logrará variando la relación aire/combustible. El tiempo de duración de cada experimento será de una hora.

Análisis y discusión

En el presente, la conversión termoquímica de la biomasa a través de la pirólisis en las tecnologías de lecho fluidizado, para muchos autores representa un enorme potencial para la producción de bio aceites y productos de alto valor para

la industria química y farmacéutica por las ventajas que estos presentan; se ha demostrado a través de estudios realizados que el escalado de estas plantas influyen en el aumento considerable del rendimiento de los productos líquidos.

Las tecnologías antes mencionadas mostradas en la tabla 1, presentan sus ventajas y a su vez, haciendo un análisis de los rendimientos de los líquidos es considerable a tener en cuenta, puesto que éstas alcanzan de un 70-75 %, no obstante, si analizamos la complejidad o subsistemas que éstas presentan son bastante costosas, puesto que la mayoría de estas instalaciones tienen diferentes agregados tales como: (1) La presencia de una cámara de combustión externa para el proceso de precalentamiento y encendido. (2) Utilizan partículas sólidas inorgánicas (arena) como portador de calor, (3) para separar los gases no condensables de los condensables utilizan precipitadores electrostáticos que si bien son efectivos, aumentan el consumo de energía eléctrica. Muchos autores han definido que no existe una tecnología óptima para este tipo de proceso, depende de muchos factores y de lo que se quiera obtener /4/.

La tecnología propuesta por el grupo de Investigación de Aprovechamiento de los Residuos Forestales de la Universidad de Oriente en la Facultad de Ingeniería Mecánica mostrada en la figura 2, tiene disímiles ventajas, tales como: (1) Ausencia de fuente externa de calor para la realización del proceso, debido a que el calor es obtenido por la oxidación parcial de la biomasa alimentada al reactor, lo que elimina los complejos sistemas de suministro de energía. (2) No se utiliza en el proceso partículas de sólidos inorgánicas (arena) como portador de calor en el reactor, debido a que la oxidación parcial de la biomasa, libera el calor necesario para el proceso, lo que permite eliminar el complejo sistema de almacenamiento, alimentación, recirculación y manipulación de arena. (3) Los vapores son rápidamente enfriados, condensados y separados de los gases incondensables en un novedoso sistema de condensación ciclónico, el cual esta dotado de una superficie cónica de acero inoxidable, donde los vapores al entrar tangencialmente, adquieren un movimiento de rotación y traslación, posee además una camisa por donde circula el agua de

enfriamiento que permite evacuar los gases incondensables. La invención de este sistema de condensación ciclónico permite: (1) Garantizar la pureza del bio aceite, al no tener que recircular a través de tuberías y no pasar por ningún sistema de bombeo, evita las obstrucciones en los conductos. (2) Aumento del coeficiente de transferencia de calor de los vapores al agua de enfriamiento, debido al aumento de la velocidad de rotación y traslación que experimentan los vapores al entrar tangencialmente en la superficie cónica. (3) No utiliza sistema de vacío para extraer los gases incondensables debido a que el movimiento de rotación y traslación de los vapores y gases incondensables en la superficie, garantiza poca caída de presión en el sistema. (4) Poca complejidad del sistema, facilidad de limpieza, mantenimiento técnico, intercambiabilidad de las piezas y larga durabilidad.

Conclusiones

1. El proceso de pirólisis representa una vía ventajosa para la conversión de los residuos agroforestales ya que es posible la obtención de líquidos, carbón y gases.
2. Las tecnologías de pirólisis difieren de muchos aspectos, en lo que respecta a agregados y subsistemas que la componen, se ha reflejado en diferentes literaturas que no existe una propuesta óptima, la calidad y proporción de los productos que se obtienen del proceso, dependen de muchos factores.
3. La pirólisis en lecho fluidizado en comparación con otros procesos presenta ventajas significativas tales como: (1) estructuras simples (2) utilización de diferentes diámetros de partículas, (3) fácil operación (4) fácil escalado, (5) altos flujos de transferencia de calor y masa y (6) altos rendimientos que la hacen más interesante y atractiva.
4. La tecnología propuesta de lecho fluidizado por el Grupo de Investigaciones de residuos agroforestales de la Facultad de Ingeniería Mecánica en la Universidad de Oriente, promueve la factibilidad del estudio del proceso a gran escala, lo que representa un indicador para aumentar el rendimiento de los productos líquidos.
5. En la actualidad, el país cuenta con enormes cantidades de residuos agroforestales y no se aprovechan en su mayoría (exceptuando el bagazo) ya sea con fines energéticos o la conversión de éstos en productos de alto valor para la industria química y farmacéutica, que al ser eliminados traen el consiguiente impacto ambiental.

Bibliografía

1. Antal, M.: "Biomass Pyrolysis: A Review of the Literature. Part I. Carbohydrate Pyrolysis". Editado por K.W. Boer. American Solar Energy Society, Boulder, Colorado, 1982, págs. 61-174.
2. Archer, E., Heermann, C.: "An Alternative to Biomass Combustion". 12th European Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, Amsterdam, The Netherlands, 2002, págs. 872-875.
3. Bridgwater, A.V.: "Catalysis in thermal biomass conversion". Elsevier, 116, 1994, p. 5-47.
4. Bridgwater, A., Peacocke, G.: "Fast pyrolysis processes for biomass". Bio-Energy Research Group, Aston University, Birmingham, B4 7ET, UK. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 4, 2000, págs. 1-73.
5. Maschio, G., Koufopoulos, C., Lucchensi.: "A. Pyrolysis a promising route for biomass utilization". In Bioresources Technology, Elsevier Science Publishers, 42, 1992, págs. 219-231.
6. Roy, C.: "Step-Wise and one Step Vacuum Pyrolysis of Birch-Derived Biomass to Monitor the Evolution of Phenols". Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 60, 2001, págs. 219-231.
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, 2000, págs. 271-279.
8. Shafizadeh, F.: "The Chemistry of Pyrolysis and Combustion. The Chemistry of Solid Wood". American Chemical Society, 28, 1984, págs. 489-529.
9. Suárez, J., Beatón, P.: "Avances en los Procesos de Pirólisis Rápida de la Biomasa". Memorias de la Segunda Conferencia Internacional de Eficiencia Energética y Refrigeración. CD ROM ISBN 959-207-017-2, 2001 págs. 1-14.
10. Suárez, J., Beatón, P.: "Physical Properties of Cuban Coffee Husk for use as an Energy Source". Energy Sources, 25, 2003, págs. 953-959.
11. Suárez, J., Beatón, P., Grimm, A., Zanzi, R.: "Autothermal Fluidized Bed Pyrolysis of Cuban Pine Sawdust". Energy Sources, 20, 2004, págs. 1-19.
12. Zhongyang, L., Shurong, W., Yanfen, L., Jinsong, Z., Yueling, G., Kefa, C.: "Research on biomass fast

pyrolysis for liquid fuel. Clean Energy and Environment Engineering Key Laboratory of

Ministry of Education, Zhejiang University". Biomasa and Bioenergy, 26, 2004, págs. 455-462.