



NUEVAS REALIDADES PARA LA EDUCACIÓN EN INGENIERÍA:
CURRÍCULO, TECNOLOGÍA, MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

13 - 16
DE SEPTIEMBRE

2022

CARTAGENA DE INDIAS,
COLOMBIA



Aprovechamiento energético de residuos de madera mediante el proceso de pirólisis en CO₂

Daniel Alejandro Satizábal, Astrid del Socorro Altamar Consuegra, Gabriel de Jesús Camargo Vargas, Rafael Nikolay Agudelo Valencia

**Universidad Libre
Bogotá, Colombia**

Resumen

La Industria maderera genera residuos que pueden ser aprovechables energéticamente a través de procesos de conversión térmica, lo cual presenta numerosas ventajas, entre las que se destacan un mayor contenido de energía por volumen, bajo contenido de cenizas y también de compuestos como nitrógeno y sulfuros. Este estudio da a conocer una forma de valorizar los residuos de madera provenientes de actividades industriales obteniendo materiales de mayor valor energético. En esta investigación se pirolizó la biomasa utilizando diferentes tamaños de partícula y niveles de temperatura para evaluar los productos obtenidos a una condición experimental dada, y así evaluar su potencial en la generación de nuevos materiales que pueden ser utilizados como combustibles. Por consiguiente, los residuos de madera fueron tamizados y alimentados a un sistema de pirólisis que consiste en un reactor de lecho fijo y un sistema de condensación donde se llevó a cabo la etapa de pirólisis en atmósfera inerte usando CO₂ como gas de arrastre. De este proceso se obtuvieron tres productos: char (material sólido), bioaceite y gases. El char de un tamaño de 850um, temperatura de 500°C y tiempo de residencia de 30 minutos tuvo el poder calorífico más alto, demostrando a su vez la factibilidad de este producto sólido (char) para ser aprovechado energéticamente.

Palabras clave: residuos de madera; pirólisis; char

Abstract

The wood industry generates waste that can be used energetically through thermal conversion processes, which has numerous advantages, among which are a higher energy content by volume, low

ash content and compounds such as nitrogen and sulfides. This study reveals a way to valorize wood waste from industrial activities obtaining materials of greater energy value. In this research, biomass was pyrolyzed using different particle sizes and temperature levels to evaluate the products obtained at a given experimental condition, and thus evaluate its potential in the generation of new materials that can be used as fuels. Consequently, the wood waste was sieved and fed into a pyrolysis system consisting of a fixed bed reactor and a condensation system where the pyrolysis stage was carried out in an inert atmosphere using CO₂. Three products were obtained from this process: char (solid material), bio-oil and gases. The char of a size of 850um, temperature of 500°C and residence time of 30 minutes had the highest calorific value, demonstrating in turn the feasibility of this solid product (char) to be used energetically.

Keywords: wood waste; pyrolysis; char

1. Introducción

El incremento del consumo de energía ha venido aumentando paulatinamente, la producción en masa y el estilo de vida de las personas tienen un impacto sobre el planeta y nuestros recursos naturales, ante la demanda de tanta energía los países deben buscar soluciones que no tengan un impacto tan significativo en el ambiente, se deben implementar nuevas tecnologías que cumplan con las necesidades de las personas y sean amigables con el planeta, además apoyar a las instituciones y académicos para que se mejoren y continúen los estudios de nuevos tipos de energía.

Es importante que se generen nuevos tipos de energía, que sean asequibles y rentables por consiguiente más personas se pueden beneficiar de esta necesidad básica tan importante. Hoy en día ha tomado mayor importancia la búsqueda de nuevas alternativas energéticas debido a la disminución en la disponibilidad de los combustibles fósiles, los cuales son de gran importancia en la sociedad actual para el desarrollo cotidiano de sus actividades sociales y económicas. Asimismo, el implemento de los combustibles fósiles, aproximadamente un 95% de la energía primaria mundial generan impactos negativos de gran transcendencia para la sociedad. (Guevara, 2014)

Las políticas de numerosos países están acelerando cada vez más el proceso de modificar la matriz energética, tomado en consideración políticas de diversa índole, como: acelerar la sustitución de vehículos a Diesel o gasolina por vehículos eléctricos, incentivar las fuentes alternas de energía (IEA, 2018). Una de estas es el uso de biomasa para procesos térmicos y cogeneración en la producción simultánea de vapor y electricidad, asociados principalmente al uso de residuos agropecuarios, así como con el uso de biomasa para biocombustibles. Además de esto es importante destacar que el aprovechamiento energético no contribuye a aumentar el efecto invernadero puesto que el balance de dióxido de carbono generado por la combustión es reabsorbido mediante la fotosíntesis en el crecimiento de las plantas necesarias para su producción y, por tanto, no se hace notable el crecimiento de CO₂ en la atmósfera (ONU, 2008).

Por su parte la madera ha sido una fuente de energía desde los primeros pasos del hombre en la tierra, gracias a ella se ha podido cocinar alimentos, sobrevivir las noches frías y recorrer distancias grandes desde que se descubrió el fuego. Una gran parte de la población mundial utiliza leña para



cocinar y calentar el hogar, sobre todo en los países en desarrollo, se calcula que la energía de la biomasa combustible tradicional asciende a casi la décima parte del total actual de la demanda humana de energía (Smith, s.f.). Adicionalmente la cantidad de residuos de madera urbana que son desechados en las ciudades y por las empresas, no son aprovechados perdiendo la oportunidad de ser transformados y obtener diferentes productos que pueden darle un valor agregado a la madera que ya cumplió con su ciclo de vida además de evitar que estos materiales sean dispuestos en rellenos sanitarios.

2. Materiales y métodos

La muestra consistió en residuos de madera proveniente de actividades industriales, la cual se sometió a operaciones de reducción de tamaño teniendo en cuenta que pueda ser caracterizada y se lleve a cabo el proceso de pirólisis y no esté afectada por una inadecuada transferencia de calor al interior de la partícula. (Jeong Wook Kim, 2014). Los tamaños utilizados para la experimentación fueron de 250 μm y 850 μm .

Para el proceso de pirólisis se utilizó un reactor de lecho fijo dentro de un horno en el cual se garantizaba la temperatura. Como gas inerte se utilizó dióxido de carbono a un caudal de 5 pie^3/min . Los gases generados en el reactor fueron condensados y liberados a la atmósfera luego de su limpieza.

Para la determinación del poder calorífico de la muestra de residuos de madera y las pirolizadas se utilizó un calorímetro de bomba de oxígeno marca PARR.

El análisis próximo se realizó siguiendo las normas ASTM D3173 para la humedad, ASTM D3174 para las cenizas y ASTM 3175 para la materia volátil.

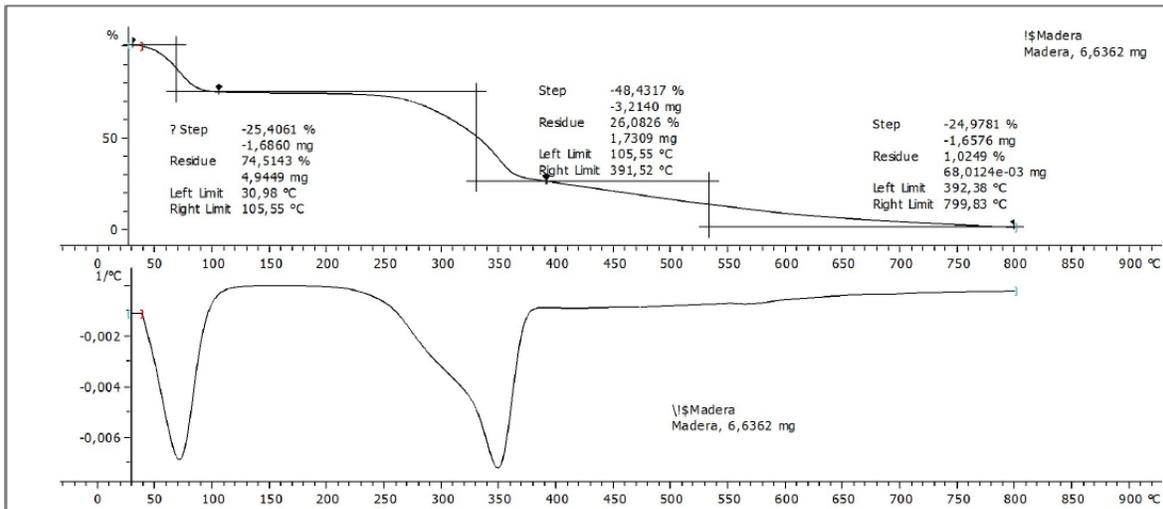
La temperatura de pirólisis se determinó a partir de análisis termogravimétricos realizados a las muestras de residuos de madera. La muestra se calentó en atmósfera inerte entre 25°C y 1000°C a una tasa de calentamiento de 10K/min.

3. Resultados y discusión

La temperatura de pirólisis fue definida a partir del análisis termogravimétrico (Figura 1), en la cual se observa la descomposición de la muestra alrededor de los 250°C presentando una pérdida de masa constante hasta los 350°C. El pico entre 250 y 350°C representa la descomposición de la hemicelulosa (J.W Kim, 2014) y entre 350°C y 370°C lo hace la celulosa. Teniendo en cuenta lo anterior se seleccionaron como temperaturas de pirólisis 400°C y 500°C.



Figura 1. Análisis termogravimétrico de residuos de madera.



En cuanto al proceso de pirólisis se realizaron ensayos a dos temperaturas 400 y 500°C y diámetros de 250 y 850 µm (Tabla 1). Los resultados obtenidos muestran el efecto del tamaño de partícula y la temperatura en la distribución de los productos sólidos y líquidos. Se observa que manteniendo la temperatura constante y al aumentar el tamaño de partícula el porcentaje de char obtenido es mayor, lo anterior se cumple tanto para la temperatura de 500°C como la de 400°C. Esto se debe a que a mayor tamaño de partícula menor área superficial específica y existe una insuficiente transferencia de calor al interior de la partícula. También se observa que al aumento de la temperatura a un tamaño de partícula fijo disminuye la producción de char, lo cual está en concordancia con otros estudios en la literatura (J. W. Kim et al 2014).

Tabla 1. Resultados de pruebas de pirólisis de residuos de madera.

Temperatura (°C)	Tamaño de partícula (micrómetros)	% Productos Líquidos	% Productos sólidos (char)
500	250	41.04	24.5
400	250	42.4	25.19
500	850	43.75	38.75
400	850	43.73	45.51

En cuanto a la producción de líquidos, se observa una tendencia en las dos temperaturas y es que, a tamaños de partículas menores, hay una menor producción de líquidos dado que la partícula es sobrecalentada y de esto sigue la conversión de los vapores en productos gaseosos (J. W. Kim et al 2014). En el caso de las partículas de 850 micrómetros se obtuvieron rendimientos de líquidos muy similares, por lo que en general, las limitaciones en la producción de líquidos pueden deberse tanto a una insuficiente transferencia de calor como a un sobrecalentamiento de la partícula, por lo cual es necesario optimizar el proceso para obtener el rango de tamaño de partícula adecuado que permita una mayor producción de líquidos. Otra razón por la que se produce mayor cantidad de líquidos a temperaturas más bajas es porque se favorecen las reacciones primarias que



conducen a la formación de vapor que luego se condensa y a altas temperaturas se favorecen las reacciones secundarias dando lugar a mayor formación de gases (A.K. Varma et al, 2019) El análisis próximo de las muestras de residuos de madera se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Análisis próximo muestras de residuos de madera

%Humedad	%Cenizas (base seca)	%Materia volátil (base seca)	%Carbono Fijo (Base seca)
8,1541	0.2915	81.1700	10.3844

Para el porcentaje de humedad de la biomasa, se encontraron resultados muy similares, entre el 9 y el 11%, correspondientes a este tipo de residuos y así mismo, los residuos de madera en dicho estudio presentaron porcentajes de cenizas y carbono fijos mayores a los encontrados en este estudio, 1.8% y 19.6% en base seca respectivamente, pero contenido de materia volátil muy similar (80.1%). A.I. Moreno, R. Font, 2015. Sin embargo en el estudio realizado por J.W. Kim et al (2014), para la misma muestra de residuos de madera se encuentran porcentajes de carbono fijo del orden del 11.03% muy similar a los resultados del presente trabajo y en el estudio realizado por F.A.López et al (2013) se obtuvieron resultados de humedad del 9.5%, carbono fijo del 7.4% y materia volátil del 82.1% corroborando así la información obtenida en esta investigación.

En cuanto al poder calorífico se encontraron resultados comparables con los de (Félix A. López, 2013) se obtuvieron valores en el rango entre 30.3 y 34.9 KJ/Kg para los char de biomasa y valores en el rango entre 18.1 y 19.9 KJ/kg para la biomasa.

Para la determinación del análisis último se utilizaron correlaciones basadas en el trabajo de J.L de Oliveira et al (2013), se determinó el análisis elemental para la biomasa, obteniendo un 43.547% de C, 4.865% de H y 29.619% de O, lo cual está del mismo orden de magnitud de trabajos encontrados en la literatura como el de A.I. Moreno, R.Font, 2015 con rangos entre 47.9% y 52.7%.

4. Conclusiones

- A partir del análisis termogravimétrico realizado a los residuos de madera fueron seleccionadas las temperaturas de 400°C y 500°C dado que la mayor pérdida de masa se presenta entre las temperaturas de 200 y 370°C.
- Luego del proceso de pirólisis se identificó la disminución de materia volátil en los residuos de madera y contenido de humedad, por otra parte, se ve aumentada la cantidad de carbono en la muestra.
- A mayor tamaño de partícula aumenta el rendimiento en productos sólidos a una temperatura dada. En el caso de producción de líquidos se observó que a menores tamaños de partícula y altas temperaturas se disminuye el volumen de bioaceites dado que se favorecen las reacciones secundarias.
- Los mejores resultados de pirólisis en cuanto a poder calorífico se obtuvieron a una temperatura de 500 °C y diámetro de 850 micrómetros con un valor de 31045.92 KJ/kg valorizando energéticamente los residuos de madera después de ser pirolizados.



- La madera urbana es una buena opción para realizar procesos de pirólisis y obtener productos aprovechables debido a que la muestra inicial ya cuenta con una humedad baja y luego de su pirólisis, logra bajar su contenido de humedad de forma considerable y obtener como resultado un material con mayor contenido de carbón.

5. Referencias

- Ana Isabel Moreno, R. F. (2015). Pyrolysis of furniture wood waste: Decomposition and gases evolved. *ELSEVIER*, 464-473.
- Anil Kumar Varma, Lokendra Singh Thakur, Ravi Shankar, Prasenjit Mondal (2019), Pyrolysis of wood sawdust: Effects of process parameters on products yield and characterization of products, *Waste Management*, Volume 89, pp 224-235.
- Félix A. López, T. A.-D. (2013). Textural and fuel characteristics of the chars produced by the. *ELSEVIER*, 551-558.
- Jeong Wook Kim, H. W.-G.-K.-K. (2014). Influence of reaction conditions on bio-oil production from. *Elsevier*, 41-48.
- Jofran Luiz de Oliveira, Jadir Nogueira da Silva, Emanuele Graciosa Pereira, Delly Oliveira Filho, Daniel Rizzo Carvalho (2013). Characterization and mapping of waste from coffee and eucalyptus production in Brazil for thermochemical conversion of energy via gasification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 21 pp. 52-58.
- M.A. Garrido, R. Font. (2015). Pyrolysis and combustion study of flexible polyurethane foam. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. Volume 113, pp. 202-215.
- Guevara Alvarado, Nicolás. (2014). Evaluación geológico - minera del "ANAP Cahuacho". Distrito Cahuacho, provincia Caravelí, región Arequipa). Consultado el 2 de junio en https://www.lareferencia.info/vufind/Record/PE_099dd753d275a6af5a939a1c633286d2/Core
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. How is the world of energy changing?. Francia: IEA Publications, noviembre 2018. p.2.
- Smith, K. R. (s.f.). *FAO*. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Consultado el 5 de junio en <http://www.fao.org/3/a0789s/a0789s09.htm>
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN. Efectos de los biocombustibles en el medio ambiente. 1 ed. Roma: Subdivisión de Políticas y Apoyo en Materia de Publicación Electrónica, 2008. p.63.

Sobre los autores

- **Daniel Alejandro Satizábal:** Ingeniero Ambiental, Universidad Libre Sede Bogotá. daniela-rodriguez@unilibre.edu.co.
- **Astrid del Socorro Altamar Consuegra:** Ingeniero Químico, Máster en Ingeniería Química, Doctor en Ingeniería Química de la Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil. Profesor Jornada completa Universidad Libre sede Bogotá. astridd.altamarc@unilibre.edu.co.
- **Gabriel de Jesús Camargo Vargas:** Ingeniero Químico, Máster en Ingeniería Química. Profesor Jornada completa Universidad Libre sede Bogotá. gabriel.camargov@unilibre.edu.co.



- **Rafael Nikolay Agudelo Valencia:** Ingeniero Químico, Máster en Ingeniería Ambiental. Profesor Jornada completa Universidad Libre sede Bogotá. rafaeln.agudelo@unilibre.edu.co.

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2022 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)

