

PIRÓLISIS SOLAR:

Una ruta brillante hacia la generación de combustible

Autores:

Ernesto Anguera Romero ⁽¹⁾,
Heidi Isabel Villafán Vidales ⁽¹⁾,
Arturo Aspiazu Méndez ⁽¹⁾,
Nidia Aracely Cisneros Cárdenas ⁽²⁾..

Adscripciones:

(1) Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México.

(2) Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, Facultad Interdisciplinaria de Ingeniería, Universidad de Sonora.

DOI: [10.59730/rer.v12n57a3](https://doi.org/10.59730/rer.v12n57a3)

INTRODUCCIÓN

La crisis energética global se ha intensificado en los últimos años cuyas causas se atribuyen a diversos factores como el incremento en la tasa de crecimiento poblacional, el consumo de energía per cápita, las tensiones geopolíticas, las crisis públicas de salubridad, la crisis ambiental, los desastres naturales, entre otros. En el año 2024, se estimó que el consumo global de energía primaria se distribuyó de la siguiente forma: 86% de fuentes de energía fósiles y 14% de fuentes de energías renovables. Aunado a lo anterior, las emisiones de bióxido de carbono se calcularon en 37,790,000 millones de toneladas [1].

Las causas y las repercusiones de esta crisis se encuentran estrechamente vinculados, influyéndose mutuamente y generando efectos recíprocos. El efecto más importante es la crisis ambiental que produce alteraciones en la seguridad hídrica, energética y alimentaria, contribuyendo de forma negativa a la calidad de la vida humana y su desarrollo.

Las múltiples aristas de esta problemática requieren de un conjunto de soluciones con diversos actores participando activamente. Los esfuerzos gubernamentales en conjunto con la participación de la academia y la industria para desacelerar la crisis energética promueven el uso y el desarrollo de tecnologías de energías renovables sostenibles más limpias como la solar. La crisis actual, al igual que la crisis del petróleo en los años setenta, provocaron avances significativos en temas de eficiencia energética y en energía solar y eólica, así como en la energía nuclear [1].

Por su parte, el sector académico ha realizado esfuerzos a nivel nacional e internacional para el desarrollo de tecnología que usa energía solar concentrada para la producción de combustibles a partir del tratamiento de residuos orgánicos. Los tratamientos de materia orgánica se dividen en bioquímicos y termoquímicos.

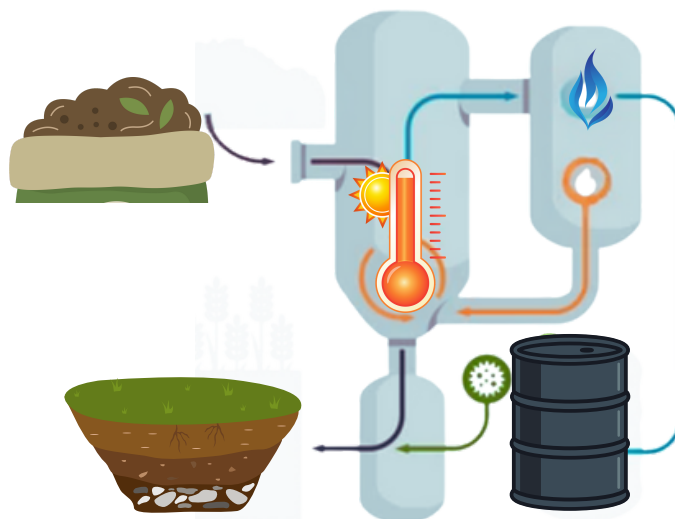
El tratamiento bioquímico de biomasa involucra el uso de microorganismos para transformar la biomasa en combustible, químicos o potencia eléctrica. Por otra parte, el tratamiento termoquímico utiliza calor y en ocasiones, catalizadores; y tienen la misma finalidad que el método anterior [2]. El procesamiento termoquímico de biomasa se clasifica en los siguientes procesos: combustión, gasificación, licuefacción por solventes y pirólisis. Cada uno de estos con diferentes condiciones de operación como la temperatura, la presión y la atmósfera en la que se llevan a cabo la reacción.

Así mismo, cada uno de estos tratamientos genera diferentes productos, por lo que la selección de un método dependerá del producto que se desee obtener.

Usualmente, los tratamientos bioquímicos son menos costosos que los termoquímicos, sin embargo, estos últimos presentan tiempos de procesamiento más cortos que los primeros y son considerados comercialmente atractivos a pesar de los retos tecnológicos actuales [3]. Aunado a lo anterior, la pirólisis de biomasa en particular produce tres compuestos de interés energético que pueden ser utilizados como combustible, y que será explicado en la siguiente sección.

En este artículo, se aborda el tema de pirólisis de biomasa para la producción de combustibles a partir del suministro de calor proveniente de energía solar concentrada.

En las siguientes secciones se describirá el proceso de pirólisis, los tipos de reactores, el acoplamiento de estos reactores a los sistemas de concentración solar, así como un breve panorama general de las investigaciones desarrolladas.



¿QUÉ ES PIRÓLISIS

La pirólisis es una ruta termoquímica en la que se lleva a cabo una descomposición térmica de materia orgánica en ausencia de oxígeno. Como resultado de este proceso de transformación se obtienen gases condensables y no condensables, y un residuo sólido conocido como biocarbón (Figura 1).

De los gases condensables se obtiene un líquido viscoso llamado bioaceite [4].

Los gases no condensables son gases combustibles compuestos principalmente por metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono, formaldehído, metanol e hidrógeno [5]. El líquido viscoso o aceite es de color café, hidrofílico y polar conformado principalmente por compuestos orgánicos de alto y bajo peso molecular. Este bioaceite tiene un valor calórico menor al del diésel, pero que con procesos de refinación adecuados puede alcanzar características que le permitan ser usado en el transporte [6]. Finalmente, el residuo sólido o biocarbón es un material carbonoso que puede ser utilizado para diferentes aplicaciones, que van a depender de las características fisicoquímicas del material obtenido, las cuales cambian dependiendo de las condiciones de síntesis y la composición inicial de la biomasa.

El proceso de pirólisis se divide en tres principales subprocesos que dependen de las condiciones de operación: torrefacción, pirólisis lenta y pirólisis rápida. En cada uno de estos procesos se favorece la producción de uno de los diferentes productos, por ejemplo, en la torrefacción se obtiene principalmente biocarbón, mientras que en la pirólisis rápida se obtiene como producto principal el aceite. La tabla 1 sintetiza las condiciones de cada uno de los diferentes subprocesos y los principales productos.

En el proceso de pirólisis se utilizan biomásas con bajo contenido de humedad (<10 %) ya que se busca que el bioaceite tenga poca cantidad de agua, además la cinética y la transferencia de calor y masa juegan un papel muy importante, debido a definen los rendimientos a los diferentes productos.

Un ejemplo es la pirólisis rápida donde se busca que todas las partículas de biomasa alcancen la temperatura rápidamente con el objetivo de reducir la formación de biocarbón. En este sentido la selección y el tipo de reactor es un parámetro importante a tener en cuenta en el momento de llevar a cabo la pirólisis de biomasa.

Tabla 1. Tipos de subprocesos de pirólisis y sus condiciones de operación y rendimientos a los diferentes productos. Modificada de [4].

Nombre	Condiciones de operación	% en masa de biocarbón	% en masa de bioaceite	% en masa de gas
Torrefacción	~ 300 °C, tiempos de residencia de la fase gas mayores a 30 min.	82	0	18
Pirólisis lenta	~ 500 °C, tiempos de residencia de la fase gas mayores a 30 min.	35	40	25
Pirólisis rápida o flash	~ 500 °C, tiempos de residencia de la fase gas de 10 a 30 s.	13	75	12

TIPOS DE REACTORES

Existe una gran variedad de distintos tipos de reactores de pirólisis de biomasa, según su operación y método de carga. Estos se pueden agrupar en dos categorías, los reactores por lotes y los reactores continuos. Un ejemplo de reactores por lote o también llamados batch, son los de “retorta de carbón” (Figura 2), el cual se compone de dos contenedores, uno (el más pequeño) dentro del otro.

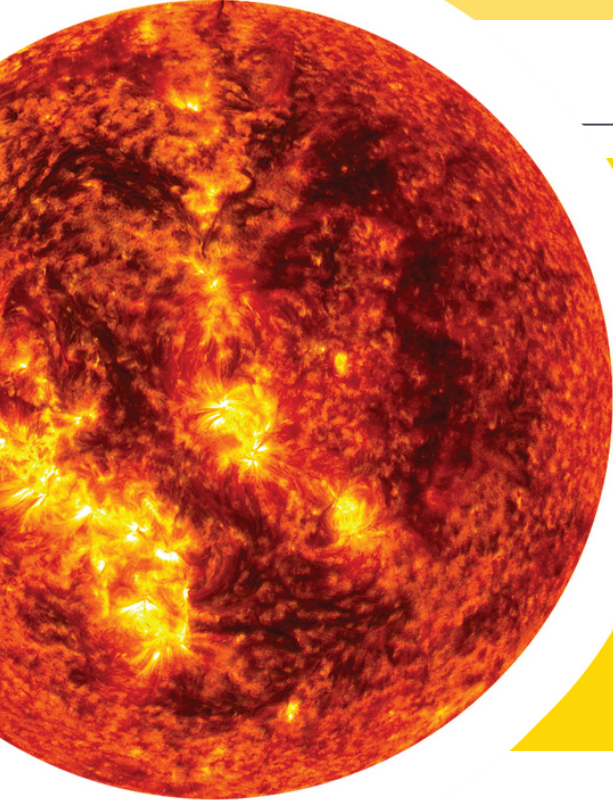
En el primero, o cámara primaria, se introduce la materia prima que se pretende carbonizar. En el segundo contenedor, o cámara secundaria, se quema algún tipo de combustible para calentar la cámara primaria hasta la temperatura requerida. Una vez que se alcanza la temperatura objetivo, los mismos gases producidos durante la pirólisis de biomasa pueden introducirse a la cámara secundaria y quemarse para asistir al calentamiento de la cámara primaria.

En la actualidad existen “retortas de carbón” comerciales debido a que son muy eficientes, baratas, fáciles de construir y operar. Una de las ventajas de estos dispositivos es que son capaces de procesar ramas grandes o leños completos. Sin embargo, una de las desventajas es que los gases y líquidos

producto de la pirólisis de biomasa no son recuperables porque se queman o son venteados a la atmósfera. El único producto recuperable con estos reactores es el biocarbón.

Por otro lado, los reactores del tipo continuo abarcan tecnologías como los reactores de tornillo de Arquímedes (también llamados de tornillo sin fin, o Auger) y los de lecho fluidizado, entre otros.

En un reactor de lecho fluidizado, se inyecta un gas caliente a una cama de arena para calentarla hasta los 500°C. A su vez el gas mueve las partículas de arena para distribuir el calor en toda la cama. Simultáneamente, se alimenta el reactor con partículas de biomasa para llevar a cabo la reacción de pirólisis.



Estos reactores son adecuados para la producción de gases combustibles y líquidos de pirólisis. Sin embargo, no son apropiados para la producción de carbón porque usualmente, el carbón contenido en la arena es quemado para proporcionar calor adicional al proceso [8]. Las ventajas de este tipo de reactores es que pueden operar de forma continua durante prolongados periodos de tiempo. Sin embargo, una de las desventajas es que requieren de alto nivel de control para su funcionamiento. Asimismo, este reactor solo puede procesar de forma adecuada partículas pequeñas, como granos o aserrín.

Cómo es posible observar, los reactores de pirólisis no son universales, priorizar las características fisicoquímicas del producto deseado, así como la cantidad que se desea producir, permite seleccionar la mejor tecnología de reactor de pirólisis.

ACOPLAMIENTO DE SISTEMAS DE CONCENTRACIÓN SOLAR

Los reactores de pirólisis requieren un suministro externo de energía para alcanzar temperaturas de operación, que van de los 300°C a los 700°C, esta energía se puede suministrar mediante la quema de un combustible, como puede ser gas, gasolina o combustóleo, o mediante la transformación de la energía eléctrica en energía térmica por medio de resistencias eléctricas.

La quema de combustibles fósiles es un proceso dañino para el medio ambiente, y la energía eléctrica que usualmente circula por la red eléctrica, también tiene un origen de generación por combustión de estos mismos combustibles. Una alternativa más amigable con el medio ambiente es generar esta energía mediante paneles fotovoltaicos. Sin embargo, cada proceso de conversión de energía tiene un porcentaje de eficiencia. La conversión de energía eléctrica en energía térmica es un proceso altamente eficiente, con una eficiencia cercana al 99%. En contraste, la conversión directa de la energía radiativa del sol en electricidad mediante paneles fotovoltaicos alcanza una eficiencia de hasta el 28%.

En este escenario, las tecnologías de concentración solar de potencia (CSP), se presentan como una alternativa versátil para suministrar la energía térmica que requiere el reactor de pirólisis. La tecnología CSP, abarca una amplia oferta de dispositivos que permiten concentrar la radiación según las necesidades térmicas y ópticas del reactor. Estas tecnologías son tan versátiles, que uno puede basar el diseño del reactor con base en una temperatura objetivo y seleccionar la tecnología CSP que mejor se ajuste al rango de temperaturas de reacción de la biomasa, para generar una cantidad mayor de gas de síntesis o biocarbón, entre otros compuestos. Aunque también es posible hacerlo de forma inversa, esto es, partiendo de un determinado sistema de concentración solar, diseñar un reactor que opere en cierto intervalo de temperaturas

Las tecnologías de concentración solar de potencia se pueden categorizar según su factor de concentración, esto es cuántas veces son capaces de concentrar la energía solar que llega al sistema de captación. Los sistemas de captación o colectores, suelen ser espejos o metales con superficies altamente reflectivas. Si la superficie del colector es completamente metálica usualmente se curva para formar una parábola o una superficie que se le aproxime, y si el colector está formado por espejos (planos), usualmente estos se orientan para reflejar la radiación a un mismo punto. Por otra parte, es posible combinar estas dos técnicas curvando la superficie de múltiples espejos y haciéndolos coincidir en un mismo punto, lo que da origen a concentradores de baja, mediana y alta concentración.

Por otro lado, también se pueden clasificar por la forma en la que la concentran la radiación, esta puede ser concentrada de forma lineal o puntual (Figura 3). Es posible aprovechar la forma de la radiación concentrada adaptando el diseño del reactor, por ejemplo, si el transporte de la biomasa se lleva a cabo dentro de una tubería, ésta puede ser irradiada por un sistema de concentración lineal, incrementando la temperatura de la biomasa durante el transporte desde la entrada hasta la salida. Estos sistemas operan de forma modular y se acoplan para formar trayectorias de mayor longitud, aumentando así el tiempo de residencia de la biomasa en la temperatura objetivo.

En los sistemas de concentración de forma lineal se encuentra el Fresnel lineal (350°C), canal parabólico (400°C) y el canal parabólico compuesto (150°C).

Los sistemas de concentración de foco puntual pueden alcanzar mayores temperaturas en áreas de menor tamaño en comparación con las tecnologías de foco lineal. Sin embargo, esta área puede crecer al retirarse de la zona focal si la potencia concentrada excede los límites del reactor. Algunos de estos sistemas son los concentradores del tipo plato parabólico (1200°C), los sistemas de torre central (900°C), los hornos solares (3000°C) y los lentes Fresnel (350°C).

El suministro de energía térmica puede realizarse de forma directa o indirecta. En el método directo, la radiación incide directamente sobre los reactivos para llevar a cabo la pirólisis. En el método indirecto, la energía térmica se transfiere primero a los componentes del reactor, usualmente conocido como receptores. Luego, el calor se transmite desde el receptor hacia la materia orgánica a pirolizar a través de un fluido en contacto con ella, un metal que actúa como intermediario térmico o un fluido transportador de calor.



Los sistemas de captación o colectores, suelen ser espejos o metales con superficies altamente reflectivas.

PANORAMA INTERNACIONAL DE LA PIRÓLISIS SOLAR

Según Maytorena et al. [9] en el 2024 el panorama internacional se registran diversos proyectos enfocados en la pirólisis solar considerando diferentes tecnologías de concentración solar. Este estudio describe una distribución por región de la siguiente forma: Asia 34, Europa 23, América del Norte 13, América del Sur 8, Medio Oriente 6, Oceanía 6 y África 3. Para ese mismo año, en el escenario nacional se reportaron formalmente 6 proyectos dedicados a este tema [9].

CONCLUSIONES

La pirólisis solar representa una alternativa prometedora para la producción sostenible de combustibles a partir de biomasa, al aprovechar la energía del sol como fuente de calor en lugar de combustibles fósiles. A través de la combinación de tecnologías de concentración solar y reactores de pirólisis, es posible optimizar la eficiencia del proceso y reducir el impacto ambiental asociado con la generación de energía.

Si bien existen desafíos tecnológicos, como el desarrollo de reactores adecuados y la mejora en el almacenamiento y uso de los productos obtenidos, los avances recientes en esta área muestran un creciente interés a nivel mundial. Con una distribución de proyectos activos en diversas regiones y el impulso de la investigación, la pirólisis solar se perfila como una solución viable para la transición energética y la reducción de emisiones de carbono.

La colaboración entre la academia, la industria y los gobiernos será clave para su implementación a gran escala y su integración en los sistemas energéticos actuales.

REFERENCIAS

[1] International Renewable Energy Agency. (2025).

[2] Stevens, C. V., Dewulf, J., Van, H., Soetaert, W., Vandamme, E., Bechtold, T., Mussak, R., Kjellin, M., Johansson, I., Bergeron, C., Carrier, D. J., Ramaswamy, S., Wyman, C. E., Kabasci, S., Stokke, D. D., Wu, Q., Han, G., Karlen, D. L., Clark, J. H., & Deswarte, F. (2011). Thermochemical processing of biomass. Wiley. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/>

[3] Wang, G., Dai, Y., Yang, H., Xiong, Q., Wang, K., Zhou, J., Li, Y., & Wang, S. (2020). A review of recent advances in biomass pyrolysis. Energy & Fuels, 34(12), 15557–15578. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c03107>

[4] Greaves García, J. (2019). Modelado cinético de la pirólisis rápida de biomasa en reactor spouted bed cónico [Tesis de maestría, Universidad del País Vasco].

[5] Demirbaş, A., & Arin, G. (2002). An overview of biomass pyrolysis. Energy Sources, 24(5), 471–482. <https://doi.org/10.1080/00908310252889979>

[6] Yang, H., Yao, J., Chen, G., Ma, W., Yan, B., & Qi, Y. (2014). Overview of upgrading of pyrolysis oil of biomass. Energy Procedia, 61, 1306–1309. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.1087>

[7] Lee, J. W., Hawkins, B., Kidder, M. K., Evans, B. R., Buchanan, A. C., & Day, D. (2016). Characterization of biochars produced from peanut hulls and pine wood with different pyrolysis conditions. Bioresources and Bioprocessing, 3, 15. <https://doi.org/10.1186/s40643-016-0092-x>

[8] Morales, S., Miranda, R., Bustos, D., Cazares, T., & Tran, H. (2014). Solar biomass pyrolysis for the production of bio-fuels and chemical commodities. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 109, 65–78.

[9] Maytorena, V. M., & Buentello-Montoya, D. A. (2024). Worldwide developments and challenges for solar pyrolysis. Heliyon, 10, e35464. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35464>