

Biocombustibles y procesos termoquímicos avanzados: Una revisión sobre tecnologías sostenibles para la conversión energética

Biofuels and Advanced Thermochemical Processes: A Review of Sustainable Technologies for Energy Conversion

Peña Murillo Sandra Emperatriz
Villa Sánchez Fabiola Elena
Santamaría Robles Ana María
Castro Figueroa Brithany Anabel
Delgado Torres Joel Enrique
Requena Mies Luis Damián

How to cite:

Peña, S. Villa, F. Santamaría, A. Castro, B., Delgado, J., Requena, L. (2026) Biocombustibles y procesos termoquímicos avanzados: Una revisión sobre tecnologías sostenibles para la conversión energética. Revista Iberoamericana De educación, 10 (1).

ABSTRACT

The objective was to conduct a critical review on the development of biofuels, focusing on the contribution of advanced thermochemical processes (ATP). Qualitative exploratory-documentary research was conducted, using a sample of peer-reviewed scientific articles from ScienceDirect. Content analysis and comparative synthesis techniques were applied. Results show that ATP optimize the conversion of lignocellulosic biomass, reduce emissions, and improve the viability of non-food sources, although challenges such as scalability and technological dependency persist. It is concluded that technological innovation and regulatory frameworks are key determinants for the future consolidation of biofuels.

KEYWORDS: Biofuels, Thermochemical, Gasification, Liquefaction, Sustainability, Transition.

RESUMEN

El objetivo fue realizar una revisión crítica sobre el desarrollo de biocombustibles, enfocándose en el aporte de los procesos termoquímicos avanzados (PTA). Se empleó una investigación cualitativa de tipo exploratorio-documental, con una muestra compuesta por artículos científicos revisados por pares extraídos de ScienceDirect. Se aplicaron técnicas de análisis de contenido y síntesis comparativa. Los resultados evidencian que los PTA optimizan la conversión de biomasa lignocelulósica, reducen emisiones y mejoran la viabilidad de fuentes no alimentarias, aunque

Received: July, 2025
Approved: July, 2025

DOI: <https://doi.org/10.31876/rie.v9i1.283>

<http://www.revista-iberoamericana.org/index.php/es>

Magister, Universidad de Guayaquil
sandra.penam@ug.edu.ec
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7848-8021>

Magister, Universidad de Guayaquil
fabiola.villas@ug.edu.ec
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9260-5810>

Magister, Universidad de Guayaquil
ana.santamariar@ug.edu.ec
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7733-723X>

persisten barreras como la escalabilidad y dependencia tecnológica. Se concluye que la innovación tecnológica y los marcos regulatorios son determinantes para su consolidación futura.

PALABRAS CLAVE: Biocombustibles, Termoquímicos, Gasificación, Licuefacción, Sostenibilidad, Transición.

RESUMO

O objetivo foi realizar uma revisão crítica sobre o desenvolvimento dos biocombustíveis, com foco na contribuição dos processos termoquímicos avançados (PTA). Utilizou-se uma pesquisa qualitativa de caráter exploratório-documental, com uma amostra composta por artigos científicos revisados por pares das bases ScienceDirect. Aplicaram-se técnicas de análise de conteúdo e síntese comparativa. Os resultados indicam que os PTA otimizam a conversão da biomassa lignocelulósica, reduzem emissões e melhoram a viabilidade de fontes não alimentares, embora persistam desafios como a escalabilidade e dependência tecnológica. Conclui-se que a inovação tecnológica e os marcos regulatórios são determinantes para a consolidação futura dos biocombustíveis.

Palavras-chave: Biocombustíveis, Termoquímicos, Gaseificação, Liquefação, Sustentabilidade, Transição.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el uso de derivados del petróleo representa aproximadamente el 70% del consumo energético en el sector transporte a nivel mundial. Dado que su demanda continúa aumentando, se estima que para el periodo 2070-2080 el mundo podría quedarse sin reservas de este recurso no renovable (Mahapatra et al., 2021, p.2). Esta dependencia crítica generaría un caos global al afectar equipos y sistemas que funcionan con derivados del petróleo (Torrentes Espinoza, 2021, p.56). Además, su uso intensivo contribuye significativamente a la emisión de contaminantes como el CO₂, acelerando el deterioro ambiental. Como alternativa, se ha propuesto el uso de biocombustibles, dado que son biodegradables, no tóxicos, libres de azufre y provienen de fuentes renovables (Malode et al., 2021, p.1).

La obtención de biocombustibles puede realizarse mediante diversos métodos, lo que permite seleccionar el proceso más adecuado según la biomasa disponible, el entorno y otros factores relevantes

(Gholizadeh et al., 2024, p.1). Estos métodos se clasifican principalmente en tres categorías: químicos, bioquímicos y termoquímicos. Entre los procesos químicos destaca la transesterificación, esencial para producir biodiésel a partir de aceites vegetales (Naseef & Tulaimat, 2025, p.3). En el ámbito bioquímico, se encuentra la digestión anaerobia, la cual permite la conversión de biomasa en biogás mediante microorganismos en ausencia de oxígeno (Gholizadeh et al., 2024, p.1). En cuanto a los procesos termoquímicos, la torrefacción y la pirólisis permiten degradar la biomasa para generar bio-oil, mientras que la licuefacción que se da a 200–600 °C y 5–25 MPa y la gasificación en 600–1300 °C, permiten la obtención de aceites, gases y carbón biológico (Wang & Wu, 2023, p. 5).

No obstante, los biocombustibles enfrentan desafíos importantes, debido a su menor eficiencia energética frente a los combustibles fósiles, lo cual limita su adopción como fuente principal y los relega al uso como aditivos (Dalbanjan et al., 2025, p.1). A pesar de ello, su valor reside en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente CO₂, y en la reutilización de residuos orgánicos, clave para el desarrollo de biocombustibles de segunda generación (Ye et al., 2024, p. 4). La casualidad de las tecnologías termoquímicas en biocombustibles surge por la falta de conocimiento y bases sólidas sobre estos procesos. Esta limitación complica la comprensión y aplicación de métodos de conversión energética. Como resultado, se generan barreras al involucrarse en alternativas renovables eficientes (Yangin-Gomec et al., 2025, p.1). A partir de este panorama, surge la necesidad de responder: cuáles son los fundamentos técnicos de los principales métodos termoquímicos para la producción de biocombustibles y cómo pueden estos procesos contribuir al desarrollo de fuentes energéticas más sostenibles frente a los combustibles fósiles. Por tanto, el objetivo de esta investigación es analizar los procesos termoquímicos avanzados, que son claves en la conversión de biomasa en biocombustibles, detallando sus principios, condiciones de operación, productos obtenidos y limitaciones tecnológicas, con el fin de comprender su viabilidad energética.

Además, la justificación de este estudio se basa en la urgencia de diversificar las fuentes de energía ante el agotamiento progresivo de los combustibles fósiles y los impactos ambientales que estos generan. A través del análisis detallado de tecnologías como la pirólisis, gasificación y licuefacción, se busca proporcionar información técnica precisa que sirva como base para

investigaciones futuras. Con ello, se pretende fomentar el uso de tecnologías termoquímicas como parte integral de una matriz energética más limpia, resiliente y sostenible.

MATERIALES Y MÉTODOS

Biomasa y Procesos Termoquímicos

Combustión

La combustión transforma directamente biomasa en energía térmica y es el método más sencillo de aprovechamiento. Su eficiencia disminuye con alta humedad en la materia prima. Se aplica en generación eléctrica, usos industriales y como opción energética en regiones en desarrollo. En la investigación realizada por (Kanwal et al., 2021, p.1) se determinó que la biomasa es neutra en carbono, tiene menos componentes de azufre y nitrógeno y es fácilmente accesible en todo el mundo por lo que representaría una alta ventaja para usarse en combustión.

Torrefacción

La torrefacción es un proceso de pretratamiento de biomasa, está constituida por tres procesos primarios en el pretratamiento de torrefacción: leve (473-508K), moderado (508-548 K) y severo (548-573 K) (Yang et al., 2024, p.1). En el proceso, la biomasa pierde gran parte de su humedad y compuestos volátiles generando un sólido carbonizado conocido como biocarbón, caracterizado por su mayor contenido de carbono y naturaleza hidrofóbica, producto de la degradación de los grupos hidroxilo (Tumuluru et al., 2021, p.1). Otro tipo es la oxidativa, que, si se controla adecuadamente, puede ser más eficiente y económica, generando biocombustibles con mayor carbonización e hidrofobicidad. Sin embargo, exige un control estricto del oxígeno (Zhang et al., 2022, p. 5).

Licuefacción hidrotermal

La licuefacción es un proceso termoquímico que convierte materiales sólidos orgánicos como biomasa, algas o plásticos en compuestos líquidos llamados bio-oils o biocrudos. Se realiza a temperaturas de 280–350 °C y presiones de 100–200 bar (Mascarell et al., 2023). En este tipo de licuefacción se utiliza agua como reactivo y no requiere secado previo, se basa en el cracking térmico de la biomasa en donde

se rompen enlaces químicos de la biomasa mediante reacciones de hidrólisis, deshidratación, descarboxilación y condensación.

Pirólisis

La pirólisis es una descomposición térmica que ocurre en ausencia total de oxígeno, mediante el método se puede producir Bio-oil, Biochar y gases combustibles, la cantidad relativa de estos tres productos puede ajustarse controlando los parámetros de pirólisis como la temperatura, velocidad de calentamiento y el tiempo de permanencia (Boer et al., 2020, p.1). La reacción es endotérmica y por lo general ocurre entre un rango de 400-1000 °C, dependiendo de la temperatura proviene el tipo de pirólisis tal como lo indica la **Tabla 1**.

Tabla 1. *Tipos de pirólisis.*

Tipo de pirólisis	Temperatura (°C)	Tiempo de residencia	Velocidad de calentamiento	Producto principal
Pirólisis lento	400–650	Minutos a días	5–100 °C/min (baja)	Biochar (~30%)
Pirólisis rápido	500–650	1–2 segundos	Hasta 1000 °C/s	Bio-oil (~70%)
Flash pirólisis	600–1000	<0.5 segundos	>700 °C/s	Aceite y gases
Pirólisis catalítico	Variable	Variable	Variable	Aceites y compuestos selectivos
Hidro-pirólisis	300–600	Variable (baja)	Alta	Hidrocarburos líquidos

Nota. Adaptado de *Slow pyrolysis of sugarcane bagasse for the production of char and the potential of its by-product for wood protection*, por Boer et al., 2020, Journal of Renewable Materials,

En la **Tabla 1** se muestra un experimento realizado, donde se utilizó una biomasa inestable como el bagazo de caña de azúcar para transformarlo en bio-carbón con los parámetros de pirólisis lenta. Esta demostró que, aunque el rendimiento de la masa inicial puede ser limitado, el producto obtenido es térmicamente estable, rico en carbono (70.5%) y con alto poder calorífico. Concluyendo que la pirólisis lenta es especialmente adecuada para transformar biomasa en biocarbón (Boer et al., 2020, p.10).

Gasificación

La biomasa sometida a gasificación se procesa a más de 700 °C con un agente oxidante controlado, generando un gas de síntesis compuesto por H₂, CO₂ y CH₄ (Mignogna et al., 2024 p.4). El gas obtenido puede usarse como portador de energía para combustible, gas hidrógeno, gas biometano, calor, suministro de energía y suministro de materias primas químicas (Mignogna et al., 2024 p.4). Además, tiene la ventaja de tener una alta capacidad para valorizar residuos orgánicos y lignocelulósicos de bajo costo, también presenta menores emisiones de NO_x, SO₂ y partículas finas que la combustión directa.

Características de la Biomasa para Procesos Termoquímicos.

Propiedades de la biomasa para el proceso

La utilización de la biomasa en reemplazo a los combustibles fósiles tradicionales surge como medida frente a la escasez de estos, sin embargo, aún no cuentan con la misma eficiencia de procesamiento para lograr los resultados de los combustibles tradicionales la cual depende en buena parte de la biomasa. (Soriano et al., 2021, p.2) menciona que dependiendo del material de alimentación y las características de la biomasa, puede utilizarse directamente en la generación de metano, cogeneración de calor y producción de biogás el cual puede provenir de racimos vacíos de frutas industriales, estiércol, animales muertos, etc. Actualmente la biomasa proporciona el 14% de la energía utilizaba y es clasificada como una fuente de energía limpia, renovable, continua y programable con un amplio espectro de crecimiento (Mignogna et al., 2024, p.5).

Tabla 2.

Fuente de materias primas de biomasa residual.

Fuentes de biomasa	Materia prima por procesar
Residuos agrícolas	Bagazo de caña de azúcar, cáscara de arroz, tallos de maíz, paja de trigo, pulpa, cáscara, rastrojo, cereales.
Residuos sólidos urbanos	Residuos domésticos, papel, alimentos, residuos de jardín.
Residuos forestales	Aserrín, desperdicios y virutas de madera, madera, hojas y cortezas, bambú.

Residuos ganaderos	Excrementos de animales, purines, estiércol de animales.
Lodos	Aguas residuales.
Residuos agroalimentarios	Desperdicio de alimentos pre-consumo, residuos de producción, desperdicio de alimentos posconsumo.
Residuos industriales	Residuos petroquímicos, farmacéuticos, agrícolas y alimentarios.
Biomasa de algas	Microalgas y macroalgas.

Nota. Adaptado de *Study of the thermochemical properties of lignocellulosic biomass from energy crops*, por Soriano et al., 2021, Energies.

La biomasa puede clasificarse en residual y primaria, siendo la residual la presentada en la

Tabla 2 y se caracteriza por ser un material de desecho de diversas actividades productivas, con mayor heterogeneidad, alto contenido de cenizas, menos carbono e hidrógeno y más nitrógeno, lo que reduce su poder calorífico, según explica (Soriano et al., 2021, p.1) (Peña & Zambrano, 2023) (Peña & Zambrano, 2023).

Aspecto de la masa resultado de los procesos

En general, estos procesos se basan en el uso de altas temperaturas para transformar la materia prima en productos por lo que la masa resultada variará dependiendo a la temperatura a la que se someta y presentará ciertas características físicas como se presenta a continuación.

Tabla 3. *Masa resultante de los diferentes métodos termoquímicos.*

Método	Temperatura (°C)	Característica de la masa resultante
Torrefacción	200-300	La masa que resulta es sólida, oscura, frágil, hidrofóbica y con menor H/C y O/C (Bio-carbón)
Pirólisis lenta	<500	Bio-carbón rico en carbono, poroso, denso y estable térmicamente
Pirólisis flash	500-1300	Poco residuo sólido, alta presencia de bio-aceite
Gasificación	>700	Principalmente cenizas y poco contenido de bio-carbón
Licuefacción	200-400	Bio-carbón compacto y oscuro

hidrotermal (HTL)

además de bio-aceite denso y ácido

Nota. Adaptado de *Biomass Energy and Biofuels: Perspective, Potentials, and Challenges in the Energy Transition*, por Tumuluru et al., 2021, Sustainability.

En la **Tabla 3**, en la mayoría de los casos, la materia prima utilizada se transforma en bio-carbón; en la torrefacción, este presenta 1–3 % de humedad, densidad aparente de 180–350 kg/m³, poder calorífico de 20–24 MJ/kg, hidrofobicidad de 60 min y buena molibilidad (Tumuluru et al., 2021). En cambio, en la pirólisis, el bio-carbón tiene bajo contenido de hidrógeno y oxígeno, con un poder calorífico de hasta 27.85 MJ/kg. El bio-aceite, como subproducto, alcanza un poder calorífico cercano a 20 MJ/kg. (Mignogna et al., 2024 p.14). También, en la gasificación la masa resultante son cenizas inorgánicas y trazas de carbono, además de ser un polvo fino, gris o negro con baja densidad aparente y representa el 10% del total de la biomasa, el resto de la biomasa se transforma en gas de síntesis con un poder calorífico de 4-10 MJ/Nm³ (Mignogna et al., 2024 p.16). Por último, en la licuefacción se puede obtener un sólido surfactante solo el cual no arde y no puede usarse como combustible por lo que forma depósitos sólidos.

Tecnologías sostenibles adaptados a procesos termoquímicos ***Innovaciones en los procesos termoquímicos***

Desde la revolución industrial, las emisiones de CO₂ han aumentado significativamente, elevando la temperatura global y el nivel del mar, lo que afecta al medio ambiente y la salud humana. La capacidad natural para absorber carbono no es suficiente, por lo que se han firmado acuerdos internacionales como Kioto y París para controlar las emisiones. La ONU y el Banco Mundial enfatizan la importancia de la energía limpia y el uso eficiente. Aunque la población mundial crece y demanda más energía, el uso de energías renovables y biocombustibles está aumentando y se espera que su consumo siga creciendo en los próximos años (Elhassan et al., 2023, p.2).

Dentro de los procesos termoquímicos, la captura y utilización de carbono (CCU) constituye una vía eficiente de mitigación del cambio climático, al permitir el aprovechamiento del CO₂ emitido durante operaciones como la combustión, gasificación, pirólisis o licuefacción. El CO₂ capturado en el punto de emisión es posteriormente comprimido y transportado hacia instalaciones donde se transforma en productos de valor añadido, incluyendo combustibles sintéticos y compuestos químicos. Este enfoque presenta ventajas frente a la producción convencional petroquímica,

al ser potencialmente más sostenible, económicamente competitivo y con menor impacto ambiental (Shahbaz et al., 2021, p. 3).

Existen tres enfoques principales para la captura de carbono: precombustión, postcombustión y oxidación. La elección de la tecnología más adecuada depende del tipo de combustible, la concentración de CO₂ y la presión del flujo a tratar. La captura postcombustión, considerada la tecnología más madura, se implementa principalmente en plantas de carbón y gas, permitiendo su integración como sistema de adaptación en instalaciones existentes. Por su parte, la precombustión se emplea en procesos donde se obtienen flujos con altas concentraciones de CO₂, como en plantas de gasificación de carbón o biomasa. La oxidación, que utiliza oxígeno puro en la combustión, genera gases de escape altamente concentrados en CO₂, facilitando su captura, aunque requiere diseños específicos para plantas nuevas. Estos tres enfoques también son aplicables a sistemas termoquímicos basados en biomasa, en muchos casos sin necesidad de modificaciones significativas (Shahbaz et al., 2021, p. 3).

Se han investigado múltiples técnicas de separación para la captura de carbono, algunas de las cuales ya se aplican en plantas de energía tanto pequeñas como grandes. La elección del método depende de los costos económicos, las condiciones operativas y la composición del gas de combustión que se desea tratar.

Minimización de emisiones y subproductos contaminantes

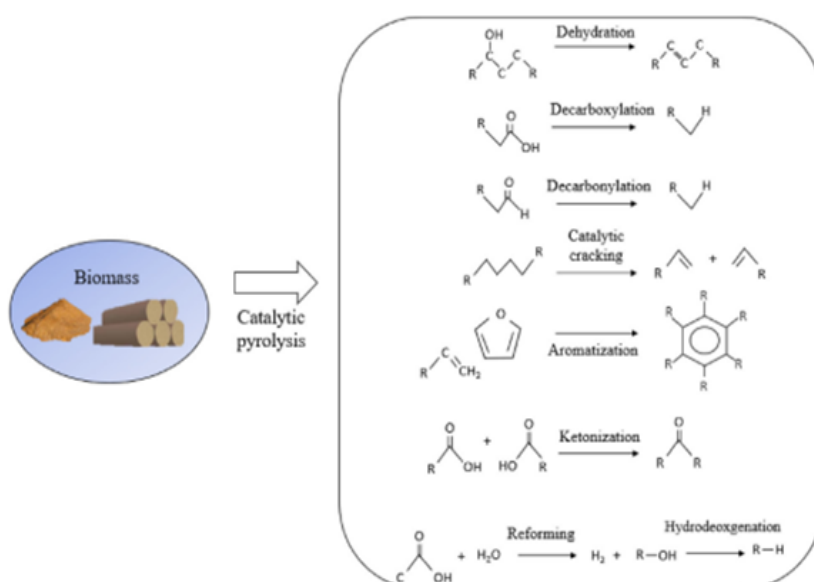
Existen métodos para la reducción de sustancias contaminantes o dañinas al momento de los procesos termoquímicos, siendo prometedoras para la producción de biocombustible. Como lo indica (Ong et al., 2019, p.6), hay catalizadores que producen variaciones en los procesos de torrefacción, pirólisis, licuefacción y gasificación. Primero la torrefacción catalítica, denominada “pirólisis suave” a 200–300 °C en ambiente inerte, produce biochar (carbón vegetal) como producto principal. Se utilizan catalizadores metales alcalinos y alcalinotérreos (AAEMs) como K, Na, Ca y Mg, aumentando la reactividad, reducción de temperatura y modifican la estructura de la celulosa, haciéndola más amorfa y fácil de descomponer.

La pirólisis catalítica, en este proceso se descompone biomasa en ausencia de oxígeno (300–700 °C), produce bioaceite, biogás y biochar. Este proceso se puede llevar a cabo de diferente manera, en

primer lugar, la lenta alta producción de biochar, siguiente rápida alta producción de bioaceite y por último, método “flash”, desarrollándose reacciones ultrarrápidas. Se utilizan como catalizadores los metales alcalinos y alcalinotérreos (AAEMs), K_2CO_3 y $Ca(OH)_2$ pueden favorecer distintos productos (más gas, menos bioaceite). Por otro lado, la zeolita son estructuras microporosas que desoxigenan bioaceite, generan compuestos aromáticos (como benceno, tolueno), y por anexar el ZSM-5 mejora mucho el poder calorífico del bioaceite.

Imagen 1.

Mecanismo de reacción de pirólisis catalítica de biomasa.



Nota. Detalles de cada una de las reacciones mediante catalizado. Adaptado de *Catalytic thermochemical conversion of biomass for biofuel production: A comprehensive review*, por Ong et al., 2019. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

RESULTADOS

Los procesos de conversión termoquímica consisten en transformar materiales carbonosos en productos intermedios líquidos o gaseosos, con el objetivo de generar combustibles, compuestos químicos, energía térmica o eléctrica. Dentro del ámbito de la conversión de biomasa, existen múltiples rutas termoquímicas, cada una caracterizada por una producción específica de compuestos y el uso de sistemas de operación variados. La eficiencia y calidad de los

Estrategias para mejorar la eficiencia de conversión energética

Imagen 2.

The diagram illustrates the integration of a CCGT plant with a district heating (DH) system. It shows the flow of combustion air, flue gas, and water/steam through various components including a boiler, flue gas condenser, DH exchanger, and DH system. Key outputs include flue gas, additional water, excess condensate, and spray water.

Lo que proponen (Dlouhý & Havlík, 2025, p.13) es un humidificador de aire entre la caldera y el condensador, este usa agua calentada por los gases de escape para rociar el aire entrante y así aumentar su humedad y temperatura antes de entrar a la caldera. Algunos beneficios para este proceso son:

- 106

- Se reduce el consumo de biomasa (hasta un 1.37% menos).
- Aumenta el calor entregado al sistema de calefacción urbana (DH) hasta en un 20% con la misma cantidad de biomasa.
- Mejora la eficiencia del sistema total, incluso si baja ligeramente la eficiencia interna de la caldera.

Potencial y perspectivas futuras de la valorización de la biomasa

En la valorización termoquímica, los procesos se basan en la descomposición de la materia orgánica mediante el uso de calor en condiciones controladas, lo que permite obtener productos que pueden ser sólidos, líquidos y gaseosos. Entre los métodos convencionales están la gasificación, pirólisis, combustión, torrefacción y la licuefacción. Según (Osman et al., 2021, p. 4077), los métodos termoquímicos destacan en aspectos clave para la producción de biocombustibles como en su eficiencia y versatilidad, ya que permiten convertir una amplia variedad de biomasa en combustibles sólidos, líquidos y gaseosos, además posee temperaturas óptimas, como en el caso de la pirólisis que opera a temperaturas más bajas ($\leq 500^{\circ}\text{C}$) frente a la gasificación ($800-1300^{\circ}\text{C}$), por último, los productos obtenidos puede refinarse para obtener combustibles compatibles con infraestructuras existentes.

Además, la producción del biocombustible está ligada a modelos de economía circular, la combinación con energías renovables, como la solar o eólica podrían reducir aún más la huella de carbono de estos procesos, sin embargo, existen desafíos clave como lo explica (Osman et al., 2021, p.8) donde menciona que la escalabilidad de tecnologías como la gasificación y la pirólisis requieren de optimización de reactores y sistemas de purificación de gases, también la utilización de catalizadores y condiciones operativas exigentes provocan que existan altos costos de producción.

La revisión y análisis de los procesos termoquímicos para la conversión energética de biomasa muestran un avance significativo en la eficiencia y sostenibilidad de estas tecnologías. A partir de la evaluación de diferentes procesos, como combustión, torrefacción, licuefacción, pirólisis y gasificación, se evidencia que cada método presenta ventajas específicas en función del tipo de biomasa y el producto energético deseado.

CONCLUSIONES

Los procesos termoquímicos avanzados, como la torrefacción, pirólisis, gasificación y licuefacción hidrotermal, juegan un papel fundamental en la valorización energética sostenible de la biomasa.

Estos métodos optimizan la conversión de residuos lignocelulósicos, reducen las emisiones contaminantes y mejoran la viabilidad de fuentes no alimentarias, contribuyendo a la diversificación y descarbonización de la matriz energética.

Su aplicación exitosa depende del continuo desarrollo tecnológico en diseño y optimización de reactores, sistemas de purificación y uso eficiente de catalizadores para superar desafíos de escalabilidad, costos y dependencia tecnológica. Integrados con energías renovables y bajo un enfoque de economía circular, estos procesos ofrecen una vía para mitigar los impactos ambientales asociados a los combustibles fósiles.

Sin embargo, para asegurar su sostenibilidad a largo plazo, es indispensable realizar análisis de ciclo de vida que equilibren energéticamente con criterios de eficiencia ecológica, consolidando así el papel de los biocombustibles termoquímicos como pilares de una transición energética más limpia y resiliente.

REFERENCIAS

- Boer, F. D., Valette, J., Commandré, J. M., Fournier, M., & Thévenon, M. F. (2020). Slow pyrolysis of sugarcane bagasse for the production of char and the potential of its by-product for wood protection. *Journal of Renewable Materials*, 9(1). <https://doi.org/10.32604/jrm.2021.013147>
- Dalbanjan, N. P., Korgaonkar, K., Kadapure, A. J., Halladamani, S. B., Ramangouda, G., & Kumar S. K, P. (2025). Green energy from waste: Evaluating the sustainability of anaerobic biofuel technologies. *The Microbe*, 7, 100410. <https://doi.org/10.1016/J.MICROB.2025.100410>

- Dlouhý, T., & Havlík, J. (2025). Effect of combustion air humidification on the operation of a biomass boiler – Theoretical analysis. *Heliyon*, 11(3), e42299. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2025.E42299>
- Gholizadeh, T., Ghiasirad, H., & Skorek-Osikowska, A. (2024). Life cycle and techno-economic analyses of biofuels production via anaerobic digestion and amine scrubbing CO2 capture. *Energy Conversion and Management*, 321, 119066. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2024.119066>
- Joshi, N. C., Sinha, S., Bhatnagar, P., Nath, Y., Negi, B., Kumar, V., & Gururani, P. (2024). A concise review on waste biomass valorization through thermochemical conversion. *Current Research in Microbial Sciences*, 6, 100237. <https://doi.org/10.1016/J.CRMICR.2024.100237>
- Kanwal, F., Ahmed, A., Jamil, F., Rafiq, S., Uzair Ayub, H. M., Ghauri, M., Khurram, M. S., Munir, S., Inayat, A., Bakar, M. S. A., Moogi, S., Lam, S. S., & Park, Y. K. (2021). Co-combustion of blends of coal and underutilised biomass residues for environmental friendly electrical energy production. *Sustainability (Switzerland)*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/su13094881>
- Mahapatra, S., Kumar, D., Singh, B., & Sachan, P. K. (2021). Biofuels and their sources of production: A review on cleaner sustainable alternative against conventional fuel, in the framework of the food and energy nexus. *Energy Nexus*, 4, 100036. <https://doi.org/10.1016/J.NEXUS.2021.100036>
- Malode, S. J., Prabhu, K. K., Mascarenhas, R. J., Shetti, N. P., & Aminabhavi, T. M. (2021). Recent advances and viability in biofuel production. *Energy Conversion and Management: X*, 10, 100070. <https://doi.org/10.1016/J.ECMX.2020.100070>
- Mascarell, J. J., Ruiz-Jorge, F. J., Abelleira-Pereira, J. M., Portela, J. R., & Martínez de la Ossa, E. J. (2023). Production of crude oil from industrial wastes and wastewaters by hydrothermal liquefaction. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 25(6). <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01771-z>
- Mignogna, D., Szabó, M., Ceci, P., & Avino, P. (2024). Biomass Energy and Biofuels: Perspective, Potentials, and Challenges in the Energy Transition. *Sustainability 2024, Vol. 16, Page 7036*, 16(16), 7036. <https://doi.org/10.3390/SU16167036>
- Naseef, H. H., & Tulaimat, R. H. (2025). Transesterification and esterification for biodiesel production: A comprehensive review

- of catalysts and palm oil feedstocks. *Energy Conversion and Management*: X, 26, 100931. <https://doi.org/10.1016/J.ECMX.2025.100931>
- Ong, H. C., Chen, W. H., Farooq, A., Gan, Y. Y., Lee, K. T., & Ashokkumar, V. (2019). Catalytic thermochemical conversion of biomass for biofuel production: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109266. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.109266>
- Osman, A. I., Mehta, N., Elgarahy, A. M., Al-Hinai, A., Al-Muhtaseb, A. H., & Rooney, D. W. (2021). Conversion of biomass to biofuels and life cycle assessment: a review. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 19, Issue 6). <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01273-0>
- Peña, S., & Zambrano, E. (2023). Biocombustibles II. Aprovechamiento de los Residuos domésticos. Tinta & Pluma.
- Shahbaz, M., AlNouss, A., Ghiat, I., McKay, G., Mackey, H., Elkhailifa, S., & Al-Ansari, T. (2021). A comprehensive review of biomass based thermochemical conversion technologies integrated with CO2 capture and utilisation within BECCS networks. *Resources, Conservation and Recycling*, 173, 105734. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2021.105734>
- Soriano, J. A., García-Contreras, R., & Carpio de Los Pinos, A. J. (2021). Study of the thermochemical properties of lignocellulosic biomass from energy crops. *Energies*, 14(13). <https://doi.org/10.3390/en14133780>
- Torrenes Espinoza, G. (2021). Retrospectiva y prospectiva del Desarrollo de las generaciones de biocombustibles. *Ciencia y Tecnología*. <https://doi.org/10.18682/cyt.vi21.2593>
- Tumuluru, J. S., Ghiasi, B., Soelberg, N. R., & Sokhansanj, S. (2021). Biomass Torrefaction Process, Product Properties, Reactor Types, and Moving Bed Reactor Design Concepts. *Frontiers in Energy Research*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.728140>
- Wang, Y., & Wu, J. J. (2023). Thermochemical conversion of biomass: Potential future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 187, 113754. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2023.113754>
- Yang, X., Zhao, Z., Zhao, Y., Xu, L., Feng, S., Wang, Z., Zhang, L., & Shen, B. (2024). Effects of torrefaction pretreatment on fuel quality and combustion characteristics of biomass: A review. *Fuel*, 358, 130314. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2023.130314>

- Yangin-Gomec, C., Dalkılıç, K., Perendeci, A., Güngörmüşler, M., Somorin, T., Roussel, J., Varol, M., Ramos, A., van Hullebusch, E. D., Trubetskaya, A., Kazanc, F., Vasić, M., Akan, A. P., Ugurlu, A., Marchetti, J., Balasundararajan, V., & Kikas, T. (2025). Thermochemical processing of organic wastes for sustainable valorisation and energy recovery: A review of recent contributions to the field. *Biomass and Bioenergy*, 201, 108122. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2025.108122>
- Ye, Y., Guo, W., Ngo, H. H., Wei, W., Cheng, D., Bui, X. T., Hoang, N. B., & Zhang, H. (2024). Biofuel production for circular bioeconomy: Present scenario and future scope. *Science of The Total Environment*, 935, 172863. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2024.172863>
- Zhang, L., Wang, Z., Ma, J., Kong, W., Yuan, P., Sun, R., & Shen, B. (2022). Analysis of functionality distribution and microstructural characteristics of upgraded rice husk after undergoing non-oxidative and oxidative torrefaction. *Fuel*, 310. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122477>