

Revisión del estado del conocimiento sobre la producción de hidrógeno a partir de la conversión
termoquímica de biomasa

Silvia Juliana Patiño Pedraza y Paola Andrea Suárez Barrios

Tesis para optar al título de Ingeniera Metalúrgica

Director:

Darío Yesid Peña Ballesteros

PhD. Corrosión.

Codirector:

Carlos Andrés Galán

PhD. Ingeniería de Materiales.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Dedico este proyecto primeramente a Dios, por darme las herramientas para trabajar en cada decisión que he tomado y por ser el motor que nunca me ha permitido darme por vencida. A mis padres Anulfo Suárez y Doris Barrios por su acompañamiento en cada etapa de mi vida y por haberme forjado como una persona útil para la sociedad. A mi hermano Julián por ser mi compañía a través de todos estos años. A Max, Blanquito, Gris y Canela por su amor puro e infinito, que cada día me motivan a ser una mejor persona. A mi fiel amiga Juliana Morales, gracias infinitas por siempre estar a mi lado, escucharme y aconsejarme sin importar la distancia. A mis amigos de la universidad Carol Rueda, Silvia Patiño, Johan Romero, Bayron Rojas, Diego García, Wendy Rueda y Angie Ferreira, soy una persona muy afortunada por haber tenido dicha de compartir este camino al lado de personas tan maravillosas y finalmente gracias a mí, por ser esa persona que nunca se rindió, que siempre creyó en sí misma y continuó y continuará para seguir alcanzando sus objetivos.

Paola Andrea Suárez Barrios.

Dedico este proyecto primeramente a Dios por bendecirme y brindarme su amor y sabiduría durante toda mi vida. A mis padres Julio Patiño y Neyla Pedraza por acompañarme, enseñarme y respaldarme en cada paso que doy, de igual manera, a mi hermana Julieth porque ellos han sido mi motivación y mi lugar seguro en diferentes situaciones. A Johan Grass, mi novio, agradecerle por su compañía, apoyo y consejos, que me han ayudado a crecer académica y personalmente. A mi compañera y amiga Paola, que me ha acompañado en este viaje académico lleno de muchas experiencias, esperando que sean las primeras de muchas. A mis amigos Diego, Bayron, David, Cristina, Angie, Carol y Wendy, personas muy especiales que me han brindado una amistad

significativa, sintiéndome una persona muy afortunada de estar rodeada de personas como ellos. Finalmente, me dedico esto, por mi resiliencia frente a situaciones que he afrontado durante mi vida y sintiéndome supremamente orgullosa de lo que fui, soy y seré.

Silvia Juliana Patiño Pedraza

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Objetivos	12
1.1 Objetivo general	12
1.2 Objetivos específicos.....	12
2. Importancia y escenario global del hidrógeno	13
2.1 Producción de hidrógeno.....	13
2.2 Biomasa como recurso para la producción de hidrógeno.....	15
3. Producción termoquímica de Hidrógeno.....	16
3.1 Gasificación de biomasa.....	17
3.1.1 Procesos de gasificación de biomasa	18
3.1.2 Reacciones de gasificación de biomasa.....	18
3.1.3 Tipos de gasificadores	20
3.1.4 Variables del proceso.....	24
3.2 Pirólisis para la producción de hidrógeno.	26
3.2.1 Descripción del proceso de pirólisis.....	27
3.3 Tipos de pirólisis	28
3.2.2 Variables del proceso.....	29
3.4 Combustión	32
4. Avances y desafíos en las tecnologías termoquímicas de gasificación y pirólisis.....	33

4.1 Gasificación de biomasa: Avances recientes y principales desafíos en la producción de hidrógeno.....	34
4.2 Pirólisis de biomasa: Avances recientes y principales desafíos en la producción de hidrógeno.....	36
4.2.1 Uso de CaO para la captura de CO2 en el proceso de pirólisis para la producción de hidrógeno.....	37
4.2.2 Plasma para pirólisis de biomasa	39
4.2.2.1 Clasificación del plasma en la pirólisis para la producción de hidrógeno a partir de biomasa	39
5. Matrices de priorización de los procesos de conversión termoquímicas para la producción de hidrógeno a partir de biomasa	42
6. Conclusiones	44
Referencias	46

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de agentes gasificadores	21
Tabla 2. Clasificación de catalizadores en gasificación de biomasa	26
Tabla 3. Parámetros operativos típicos y productos del proceso de pirólisis	29
Tabla 4. Temperaturas de descomposición y productos principales de los componentes de la biomasa durante la pirólisis.....	30
Tabla 5. Catalizadores más utilizados en el proceso de pirólisis para la conversión de biomasa.	32
Tabla 6. Ponderación para selección de tecnologías termoquímicas para la producción de hidrogeno.....	42
Tabla 7. Matriz de priorización de tecnologías termoquímicas para la producción de biomasa...	43

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Clasificación de los métodos de producción de hidrógeno.....	14
Figura 2. Adaptación de la representación de la conversión termoquímica de biomasa en biocombustibles.....	17
Figura 3. Esquema de gasificación de biomasa.....	20
Figura 4. Esquema del proceso de pirólisis de biomasa para la producción de hidrógeno.	28

Resumen

Título: Revisión del estado del conocimiento sobre la producción de Hidrógeno a partir de la conversión de biomasa*

Autores: Silvia Juliana Patiño Pedraza y Paola Andrea Suarez Barrios**.

Palabras clave: Producción, hidrógeno, biomasa, pirólisis, gasificación.

Descripción:

La producción de hidrogeno verde a partir de biomasa se considera una tecnología prometedora para alcanzar los objetivos energéticos sostenibles mundiales. La biomasa es un recurso sostenible y versátil que se puede convertir en hidrógeno a través de vías biológicas y termoquímicas a partir de una gran variedad de materias primas y tecnologías. Este documento revisa las rutas termoquímicas, que ofrecen mayores eficiencias y rendimientos en la producción de hidrógeno, así como los avances, los problemas, desafíos y perspectivas relacionados, junto con las posibles soluciones para ayudar en el desarrollo de una producción eficiente de hidrógeno a partir de la conversión termoquímica de biomasa.

* Tesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales Director: Darío Yesid Peña Ballesteros PhD. Corrosión. Codirector: Carlos Andrés Galán PhD. Ingeniería de Materiales

Abstract

Title: Review of the state of knowledge on hydrogen production from thermochemical conversion of biomass*.

Authors: Silvia Juliana Patiño Pedraza and Paola Andrea Suarez Barrios**.

Keywords: Production, hydrogen, biomass, pyrolysis, gasification.

Description: Hydrogen production from biomass is considered a promising technology for achieving global sustainable energy goals. Biomass is a sustainable and versatile resource that can be converted to hydrogen through biological and thermochemical routes from a wide variety of feedstocks and technologies. This paper reviews thermochemical routes, which offer higher efficiencies and yields in hydrogen production, as well as related advances, problems, challenges and prospects, along with possible solutions to aid in the development of efficient hydrogen production from thermochemical conversion of biomass.

* Tesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales Director: Darío Yesid Peña Ballesteros PhD. Corrosión. Codirector: Carlos Andrés Galán PhD. Ingeniería de Materiales

Introducción

Actualmente, el mundo enfrenta una crisis energética impulsada por el aumento de la demanda global y la dependencia de los combustibles fósiles, que representan aproximadamente el 88% de la producción mundial de energía como fuente primaria (Ashfaq et al., 2024). Estos recursos fueron responsables de aproximadamente el 86% de las emisiones de CO₂, ocasionando impactos ambientales nocivos y contribuyendo al cambio climático. Esta situación genera preocupaciones ambientales y riesgos para la seguridad energética, lo que destaca la necesidad de adoptar alternativas energéticas más sostenibles y limpias que garanticen un futuro viable para las próximas generaciones (Pal et al., 2022).

El hidrógeno se posiciona como una solución prometedora para los desafíos energéticos actuales, ya que es una fuente renovable y no produce emisiones contaminantes. La Agencia Internacional de Energía (AIE) prevé que la demanda mundial de hidrógeno aumentará de 94 millones de toneladas en 2021 a 115 millones en 2030 (Sikiru et al., 2024). Sin embargo, la producción de hidrógeno enfrenta importantes retos, entre ellos los altos costos asociados a su generación desde diversas fuentes energéticas, la necesidad de infraestructura adecuada y las complicaciones en el transporte y almacenamiento, debido a las propiedades físicas del hidrógeno (Nguyen et al., 2024a). Entre los métodos de producción que se destacan se encuentra el uso de biomasa, un recurso renovable proveniente de residuos agrícolas, forestales y ganaderos, que permite la obtención de hidrógeno mediante procesos biológicos y termoquímicos.

En 2019, la Asociación Mundial de Bioenergía (WBA) estimó que el mercado de productos energéticos derivados de biomasa alcanzaba los 1.300 millones de dólares, y se proyecta que para

2030, el 50% del consumo energético mundial provendrá de fuentes renovables (Hassan et al., 2023). Teniendo en cuenta lo anterior, en esta revisión bibliográfica se pretende estudiar la producción de hidrógeno a partir de biomasa por medio de procesos termoquímicos como la pirólisis y la gasificación. En el análisis de literatura se reconocieron los avances y desafíos asociados a los procesos de producción de hidrógeno, con el objetivo de identificar las tecnologías más innovadoras y prometedoras en términos de producción e impacto ambiental.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Realizar un análisis bibliográfico de las publicaciones científicas sobre la producción de hidrógeno a partir de la conversión termoquímica de biomasa.

1.2 Objetivos específicos

Describir las principales técnicas de conversión termoquímicas de biomasa a hidrógeno documentadas en la literatura científica.

Identificar los avances y desafíos asociados a los procesos de producción de hidrógeno a partir de biomasa según las investigaciones más recientes.

2. Importancia y escenario global del hidrógeno

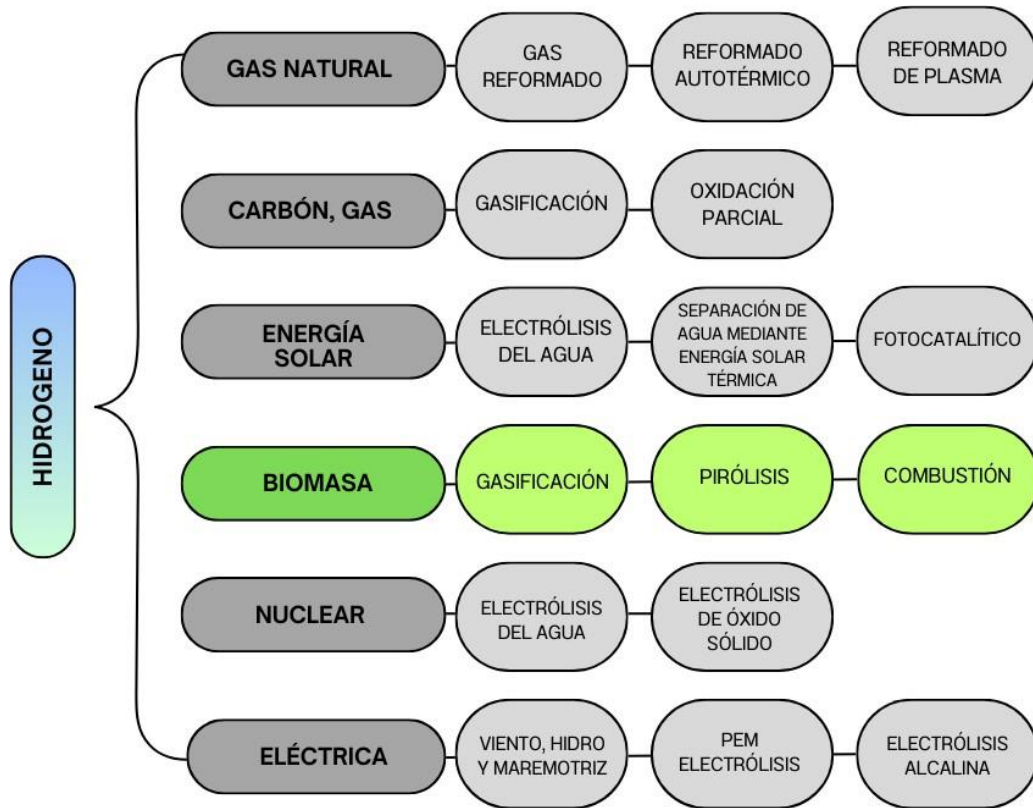
La importancia del hidrogeno ha ido creciendo de manera exponencial, debido a que se reconoce que este producto es influyente en la transición hacia un sistema energético sostenible. Este es un combustible versátil y renovable, que, al ser utilizado en pilas de combustible, produce agua como subproducto, lo que más llama la atención, es el papel importante para reducir la emisión de gases de efecto invernadero, estos gases se encuentran en la atmosfera y como consecuencia negativa, retienen y aumentan el calor de esta misma. En el panorama actual, el hidrógeno se utiliza en diversas aplicaciones industriales, como el refinado, la producción de amoníaco y como materia prima en la industria petroquímica (Rubinsin et al., 2024). La ventaja más importante del hidrógeno reside en su potencial para descarbonizar diferentes sectores, un ejemplo de esto es la industria transportadora, debido a que por medio de pilas de hidrógeno pueden alimentar a vehículos, disminuyendo considerablemente las emisiones de los motores de combustión interna (Pal et al., 2022).

2.1 Producción de hidrógeno

El hidrógeno es un elemento abundante en la tierra que se encuentra ligado químicamente a diferentes compuestos, puede ser producido a partir de combustibles fósiles, biomasa y agua. Actualmente, una fracción pequeña del hidrógeno es obtenida a partir de energías renovables. A continuación, en la figura 1, se plasman las distintas técnicas de producción de hidrógeno, en función de su fuente primaria, tecnología y tipo (Ahmad et al., 2024).

Figura 1.

Clasificación de los métodos de producción de hidrógeno



Nota. Tomado de: (Ahmad et al., 2024)

Existen procesos catalogados a base del carbono debido a la implicación del CO₂, estos son los combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural), mientras que las técnicas verdes de producción de hidrógeno son la energía solar directa, biomasa, energía eólica, hidráulica y mareomotriz.

2.2 Biomasa como recurso para la producción de hidrógeno

La biomasa, una fuente de energía renovable que surge como una alternativa para sustituir los combustibles fósiles y fomentar el desarrollo de la economía circular (Mishra et al., 2024a). Su accesibilidad y versatilidad le permiten generar biocombustibles, productos químicos valiosos, electricidad y calor. Proyecciones indican que, para 2050, la biomasa podría cubrir hasta dos tercios del consumo directo de energía renovable, jugando un papel fundamental en la transición hacia un futuro más sostenible (Nguyen et al., 2024a).

Entre los diversos materiales orgánicos que componen la biomasa, su derivado más abundante y económico es la biomasa lignocelulosa, con una producción anual superior a los cien mil millones de toneladas métricas. Este recurso incluye desechos agrícolas, forestales, industriales, urbanos y cultivos energéticos (Mishra et al., 2024). Esta biomasa lignocelulosa se compone principalmente de lignina, celulosa y hemicelulosa las cuales tienen un papel crucial en los procesos termoquímicos. La lignina, por ejemplo, suele estar presente en mayor proporción en biomasa leñosa en comparación con la herbácea, lo que aumenta la producción de hidrógeno en estos procesos (Nguyen et al., 2024a). Asimismo, las propiedades fisicoquímicas de la biomasa, como su contenido de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre influyen directamente en su rendimiento energético, composición química y las emisiones generadas.

El rendimiento de los procesos termoquímicos depende de factores como el contenido de carbono fijo, compuestos volátiles y cenizas. Una mayor cantidad de carbono fijo aumenta el poder calorífico del biocarbón, mientras que los compuestos volátiles promueven la generación de gases y líquidos. Sin embargo, estos últimos también incrementan la formación de alquitrán, mientras

que un alto contenido de cenizas puede generar escoria y reducir la eficiencia térmica del proceso (Bisen et al., 2025).

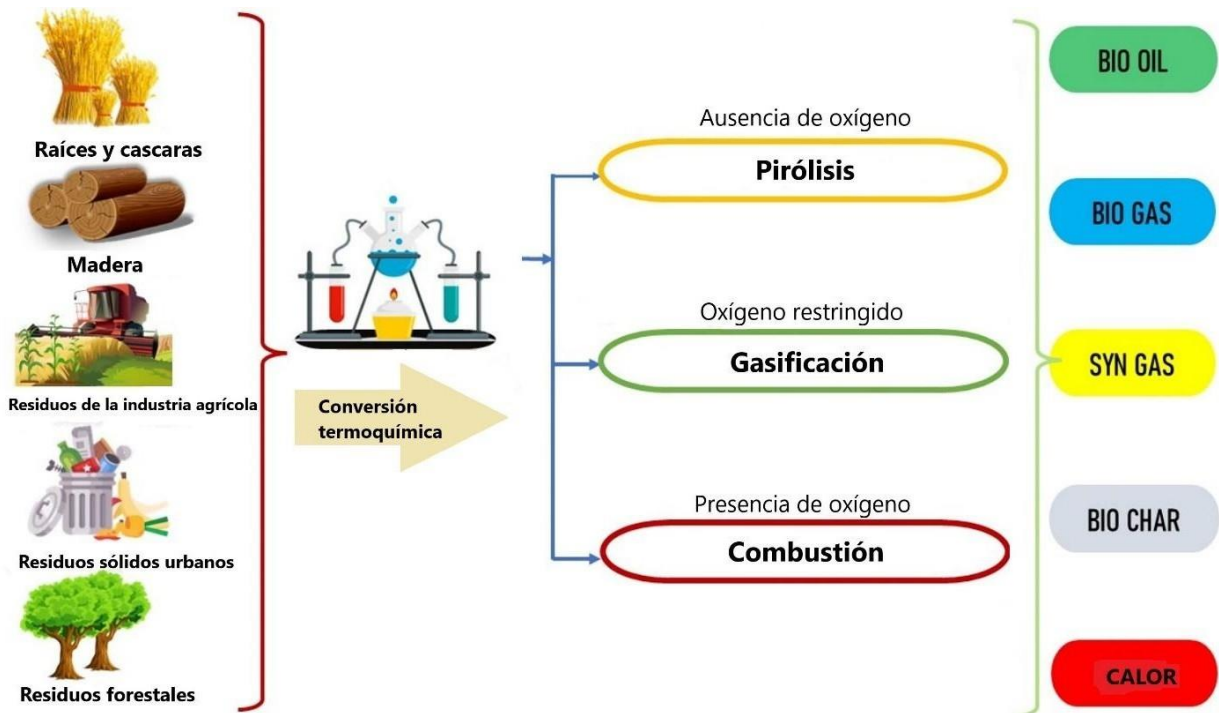
3. Producción termoquímica de Hidrógeno

La producción termoquímica comprende procesos como la gasificación, la pirólisis y la combustión, los cuales tiene la capacidad de transformar la biomasa en portadores energéticos de alto valor. En particular, la integración de gasificación y pirólisis ha demostrado ser especialmente efectiva, ya que mejora la calidad de los productos finales, incrementa la competitividad del mercado y maximiza el potencial económico de los derivados de la biomasa (Papa et al., 2024).

En la figura 2, se ilustran las principales tecnologías utilizadas para convertir la biomasa en energía mediante procesos termoquímicos:

Figura 2.

Adaptación de la representación de la conversión termoquímica de biomasa en biocombustibles.



Nota. Adaptado de: Poornima, S., Manikandan, S., Prakash, R., Deena, S. R., Subbaiya, R., Karmegam, N., Kim, W., & Govarathanan, M. (2024).

3.1 Gasificación de biomasa

Este proceso termoquímico utiliza biomasa como materia prima para sintetizar gas, este gas es rico en hidrogeno (H_2) y monóxido de carbono. En este proceso, la materia prima (biomasa) se introduce en un entorno oxidante de oxígeno con un rango de temperatura de 650 °C a 950 °C, ver figura 2, que maximizan la producción de hidrogeno debido a sus reacciones endotérmicas, aunque las temperaturas superiores a 1000 °C suelen reducir la eficiencia térmica (Zainal et al., 2024). Por otro lado, otro factor operativo clave en el proceso es la presión. En la gasificación

supercrítica, un proceso que utiliza agua en estado supercrítico como agente reactivo para convertir biomasa en gas de síntesis rico en hidrógeno (H₂), la presión alcanza aproximadamente 22 Mpa, mientras que la temperatura supera 374°C, correspondiente al punto crítico del agua (Cao et al., 2020a). Considerando lo anteriormente mencionado, el rendimiento del proceso de gasificación de biomasa se ve afectado por los parámetros operativos asociados con el tipo de gasificador, las propiedades de la materia prima y las rutas de tecnología de gasificación (Gao et al., 2023). A continuación, se detalla el proceso de gasificación.

3.1.1 Procesos de gasificación de biomasa

La biomasa experimenta una serie de reacciones del proceso de gasificación para producir productos gaseosos, es decir, H₂, CO, CO₂, CH₄. Usualmente, la gasificación se divide en función del agente gasificante (aire, O₂, CO₂ y vapor) y el sistema de reactor de gasificación con la composición del producto que varía con las tecnologías correspondientes (Valizadeh et al., 2022). Estas tecnologías se han desarrollado en pro de enriquecimiento de H₂ y CO en su producto de gasificación.

3.1.2 Reacciones de gasificación de biomasa

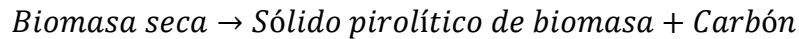
El proceso de gasificación de biomasa comprende las siguientes reacciones y etapas:

Secado: En esta etapa, la humedad de la biomasa se elimina a una temperatura relativamente baja (alrededor de 110 °C). La reacción química puede representarse como:



Esta etapa es esencial para reducir la cantidad de agua presente en la biomasa, facilitando el siguiente proceso de pirólisis (Valizadeh et al., 2022).

Pirólisis: La pirólisis ocurre cuando la biomasa seca se calienta a temperaturas inferiores a 500 °C en ausencia de oxígeno, lo que descompone la biomasa en productos sólidos y volátiles. Se forman principalmente carbón (carbono puro) y gases pirogénicos. La reacción es



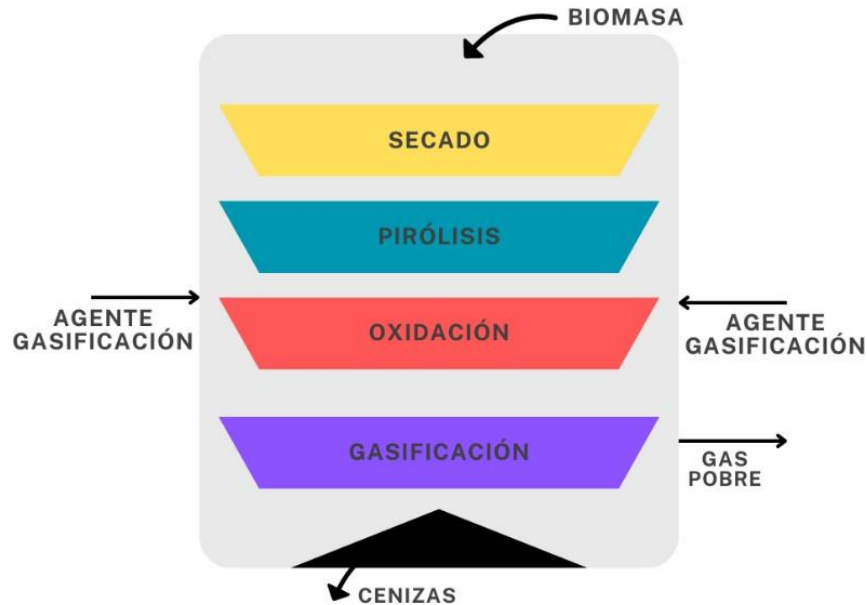
Por último, el tercer y cuarto paso son la oxidación parcial y reducción del sólido pirolítico, respectivamente, dando lugar a todas las reacciones de gasificación principales que involucran un agente gasificante (aire, O₂, CO₂, vapor).

Estas reacciones generan gases combustibles como el hidrógeno (H₂), monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂).

A continuación, en la figura 3, se presenta un gasificador de corriente descendente, mostrando de manera grafica como se da la gasificación. Este gasificador, es un reactor de flujo paralelo donde el aire entra a cierta altura por debajo de la parte superior, y el gas producto fluye hacia abajo, atravesando un lecho de ceniza caliente antes de salir. Esta configuración favorece el craqueo del alquitrán. El aire, introducido a través de boquillas alrededor de la periferia, genera una zona de combustión a temperaturas de 1200-1400 °C al encontrarse con partículas de carbón pirolizado. El gas resultante desciende a través de un lecho de carbón caliente, donde se produce la gasificación, y la ceniza generada se mezcla con el gas y cae al fondo del reactor (Akbarian et al., 2022).

Figura 3.

Esquema de un gasificador de biomasa



Nota. Tomado de: (Valizadeh et al., 2022).

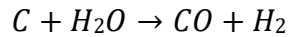
3.1.3 Tipos de gasificadores

La producción de hidrógeno (H_2) a partir de la gasificación de biomasa es un proceso predominantemente endotérmico, lo que requiere el suministro continuo de una cantidad significativa de calor al reactor para asegurar mantener la sostenibilidad de las reacciones (Ramos et al., 2018). Dependiendo de la fuente de calor y del mecanismo de transferencia térmica, los agentes gasificantes (GA) utilizados en este proceso se clasifican en dos categorías:

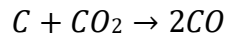
Agentes gasificantes alotérmicos: Estos agentes, como el vapor de agua (H_2O) y el dióxido de carbono (CO_2), requieren la aplicación de calor externo para reducir la materia volátil y el carbón a temperaturas superiores a $800\text{ }^\circ\text{C}$. Los GA alotérmicos no generan calor por sí mismos, por lo que necesitan una fuente externa de energía térmica para mantener las reacciones endotérmicas activas (Valizadeh et al., 2022)

Las principales reacciones endotérmicas que ocurren con los GA alotérmicos son:

Reacción de gasificación con vapor:



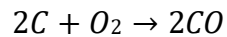
Reacción de Boudouard (con CO₂)



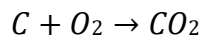
Agentes gasificantes autotérmicos: Estos agentes, como el aire y el oxígeno (O₂), generan el calor necesario para las reacciones de gasificación a través de su propia oxidación exotérmica. Durante la gasificación, estos agentes no solo actúan como reactivos, sino que también proporcionan la energía térmica necesaria mediante la oxidación parcial del carbón presente en la biomasa. Esta oxidación libera calor, lo que permite que las reacciones siguientes puedan ocurrir sin necesidad de un aporte externo de energía térmica (S. Zhao et al., 2020).

Las reacciones clave con los gasificantes autotérmicos son:

Oxidación parcial del carbón:



Oxidación de monóxido de carbono:



En resumen, de esta forma los GA alotérmicos dependen de una fuente externa de calor para llevar a cabo las reacciones de gasificación, mientras que los GA autotérmicos generan el calor necesario internamente a través de reacciones de oxidación.

Tabla 1.

Clasificación de agentes gasificadores

	Gasificante	Ventaja	Desventaja
Alotérmicos	CO ₂	<p>Reducción de emisiones: Se puede capturar y reutilizar en el proceso, reduciendo las emisiones netas.</p> <p>Mejora de la producción de CO: Favorece la reacción de Boudouard, que incrementa la producción de monóxido de carbono.</p>	<p>Menor rendimiento de H₂: El uso de este GA, tiende a generar más CO y menos hidrogeno en comparación con el vapor de agua.</p> <p>Necesidad de más calor: Requiere una temperatura alta para que las reacciones sean más eficientes.</p>
	Vapor	<p>Alta producción de hidrógeno: El vapor es el GA más eficiente para producir H₂, debido a que promueve la reacción de desplazamiento de agua-gas, que produce H₂ y CO₂.</p> <p>Syngas de alta calidad: Genera un gas de síntesis con mayor concentración de H₂ y menor cantidad de contaminantes.</p>	<p>Requiere energía externa: Es una reacción endotérmica, por ende, necesita una fuente de calor externa para mantener la reacción.</p> <p>Costo de producción: La generación de vapor a alta temperatura requiere un equipo más complejo y mayor consumo de energía.</p>
Autotérmicos	Aire	<p>Bajo costo y disponibilidad: El aire es el agente más económico y tiene una disponibilidad amplia.</p> <p>Facilita la combustión: Promueven las reacciones de oxidación que aumentan la producción de CO y CO₂, generando más calor</p>	<p>Reducción del valor calorífico del gas de síntesis: La presencia de nitrógeno en el aire diluye el gas de síntesis, disminuyendo su valor energético.</p> <p>Menor concentración de hidrogeno: La producción de H₂ es menos en comparación a otros agentes gasificantes.</p>
	O ₂	<p>Mayor eficiencia energética: Al no contener nitrógeno, el uso de oxígeno puro genera un gas de síntesis con mayor concentración de H₂ y valor energético más alto que el generado con aire.</p>	<p>Costo elevado: La producción y manejo de oxígeno puro es caro, lo que limita su uso en instalaciones industriales específicas.</p>

Gasificante	Ventaja	Desventaja
	Reacciones más rápidas y eficientes: Mejora las reacciones de oxidación, lo que optimiza el rendimiento de la gasificación.	

Nota. Tomado de: Valizadeh, S., Hakimian, H. (2022).

Teniendo en cuenta, estas ventajas y desventajas, la selección del agente gasificante va a favor de los objetivos del proceso, en el caso de que se desee un gas de síntesis de alto poder calorífico, se obtiene mediante la gasificación con oxígeno puro, aunque tiene un alto precio como para utilizarse de manera industrial a gran escala, por otro lado, se observa que la gasificación con vapor aumenta la generación de H₂.

3.1.4 Variables del proceso

Las variables durante el proceso de gasificación de biomasa para la generación de hidrogeno, están comprendidas principalmente por el agente gasificante, la temperatura de reacción, la naturaleza de la biomasa, la relación vapor-biomasa y el uso de catalizadores. Los cuales se describen a continuación:

Agentes gasificantes: El hacer una selección adecuada del GA, permite cumplir con los objetivos del proceso de gasificación con relación a factores como la producción de H₂, eficiencia energética y costo.

Temperatura de reacción: La temperatura es muy importante, debido a que, a mayores temperaturas, se incrementa la producción de hidrógeno, esto se debe a que muchas de las reacciones involucradas, como la gasificación del carbono y el reformado con vapor, son endotérmicas. La temperatura también favorece la ruptura de moléculas de biomasa, reduciendo la formación de alquitrán. Sin embargo, temperaturas excesivamente altas pueden favorecer la reacción inversa de desplazamiento de agua-gas, disminuyendo la producción de H₂ y aumentando la de CO (Valizadeh et al., 2022)

Naturaleza de la biomasa: La biomasa es un factor importante en el proceso de gasificación, porque el proceso se puede ver alterado a causa del contenido de humedad, puesto que, al tener un contenido alto, favorece la producción de H₂ en gasificación con vapor, ya que proporciona más agua para las reacciones de reformado. No obstante, en gasificación con aire u oxígeno, un alto contenido de humedad reduce la producción de H₂, ya que facilita la conversión del carbono en CO₂. Por otro lado, la composición de la biomasa se vuelve fundamental, al tener biomasa con alto contenido de carbono fijo y volátiles, como la cáscara de maní, esta tiende a

generar más H_2 que otras biomásas, como la paja de arroz, debido a su mayor capacidad de reacción. Por último, el tamaño y forma de las partículas, influyen, al contar con partículas pequeñas que tienen una mayor superficie de reacción, lo que puede mejorar la generación de H_2 . Sin embargo, si son demasiado pequeñas, pueden interferir en el contacto con el catalizador o incluso ser arrastradas fuera del reactor, disminuyendo la eficiencia de la reacción (B. Li et al., 2017).

Relación vapor-biomasa o caudales de gas: Esto varía dependiendo de cuál es el agente gasificante (GA), en primer lugar, en el caso de la gasificación con vapor, se tiene que aumentar la relación vapor-biomasa (SBR), esta favorece la generación de hidrógeno (H_2). Sin embargo, un aumento excesivo del SBR puede ser contraproducente, ya que puede reducir el contenido de H_2 , debido a una menor cantidad de calor disponible, en la que el CO_2 reacciona con H_2 para formar CO y agua. Por otro lado, en la gasificación con aire, se determina mediante la relación de equivalencia (RE), que compara la relación real de biomasa-aire con la estequiométrica. Un incremento en la RE aumenta el oxígeno disponible, lo que incrementa la tasa de combustión y, por consiguiente, los niveles de CO_2 y CO en el gas de síntesis, debido a un mayor craqueo de alquitrán. Este aumento de combustión también produce una mayor oxidación del H_2 , lo que reduce su generación (Jin et al., 2019; Yong, 2022).

Uso de catalizadores: Se tienen diferentes tipos de catalizadores, entre los que destacan catalizadores naturales, metales alcalinos y a base de níquel, los cuales se describen a continuación:

Tabla 2.*Clasificación de catalizadores en gasificación de biomasa*

Catalizadores	Descripción
Naturales (dolomita, olivina)	Ayudan a mejorar la eficiencia de la gasificación al reducir la formación de alquitrán y aumentar la producción de H ₂ . La dolomita es especialmente efectiva en la captura de CO ₂ , lo que favorece la reacción de desplazamiento de agua-gas.
Metales alcalinos (KOH, NaOH, CaO)	Mejoran la reactividad del carbón y las reacciones de reformado de hidrocarburos. El CaO, en particular, también actúa como un sorbente de CO ₂ , mejorando la producción de H ₂ y reduciendo el CO ₂ .
A base de níquel	Muy efectivos en la ruptura de enlaces C-C y C-H, incrementando la producción de hidrógeno. Sin embargo, son susceptibles a la desactivación por deposición de coque, lo que limita su vida útil.

Nota. Tomado de: Valizadeh, S., Hakimian, H. (2022).

3.2 Pirólisis para la producción de hidrógeno.

La pirólisis es un proceso de descomposición térmica que ocurre generalmente en un rango de temperaturas que oscilan entre los 400 y 800 °C con presiones hasta de 5 bar, se lleva a cabo en ausencia de oxígeno y se considera uno de los métodos más efectivos para la producción de hidrógeno. Este proceso facilita la transformación de compuestos orgánicos complejos, como la lignina, celulosa, hemicelulosa y microfibrillas (que están integradas en una matriz de lignina y hemicelulosa), en productos energéticos como gases (H₂, CH₄, CO₂, CO), combustibles líquidos (bio aceite) y carbón sólido (biochar) (Bisen et al., 2025).

3.2.1 Descripción del proceso de pirólisis.

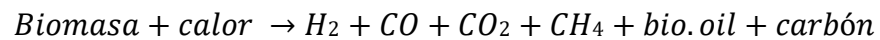
La materia prima se somete a secado y trituración antes de ser introducida en un reactor con atmósfera inerte, generalmente de nitrógeno, para evitar la combustión. En el reactor, el incremento de temperatura y el tiempo de residencia generan la pirólisis primaria, descomponiendo moléculas complejas en compuestos más simples, como carbón vegetal. En la pirólisis secundaria, esta descomposición continúa, aumentando la producción de gases. Los vapores generados se enfrían para separar:

Biogás: Principalmente H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , que permanece en estado gaseoso.

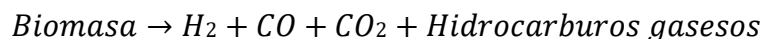
Bioaceite: Derivado de la condensación de vapores de mayor peso molecular.

Finalmente, los productos obtenidos se refinan para eliminar impurezas y aislar compuestos valiosos, las reacciones primarias y secundarias en el proceso de pirólisis son las siguientes:

Productos de la pirólisis:

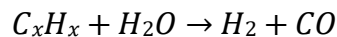


Productos gaseosos obtenidos de la pirólisis de biomasa:



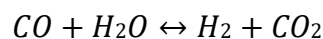
Reformado con vapor:

Los vapores y gases reaccionan con vapor de agua para formar H_2 y CO :



Reacción de desplazamiento de gas de agua:

El CO producido reacciona con vapor para formar más hidrógeno:

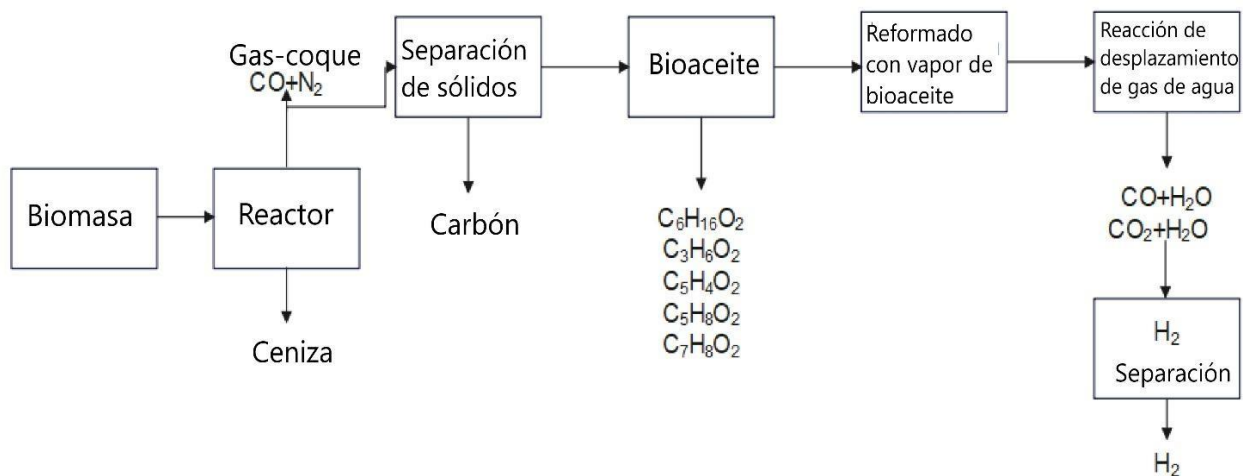


El rendimiento en la producción de hidrógeno depende en gran medida del tipo de materia prima de biomasa utilizada, las propiedades del catalizador, el rango de temperatura y el tiempo de residencia del proceso (Taipabu et al., 2022).

A continuación, se presenta un esquema en el cual se detalla el proceso de pirólisis de biomasa. Este incluye las principales etapas de descomposición térmica, la separación de productos sólidos, procesamiento de líquidos (bio aceite) y gases y las reacciones secundarias necesarias para la producción de hidrógeno.

Figura 4.

Esquema del proceso de pirólisis de biomasa para la producción de hidrógeno.



Nota. Tomado de: Jara-Cobos, L., Abril-González, M., & Pinos-Vélez, V. (2023).

3.3 Tipos de pirólisis

Dependiendo de la velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia de la materia prima en el reactor, la pirólisis se puede clasificar en:

Tabla 3.

Parámetros operativos típicos y productos del proceso de pirólisis.

Parámetros	Pirólisis lenta	Pirólisis rápida	Pirólisis instantánea
Temperatura (°C)	550-950	850-1250	900-1200
Velocidad de calentamiento (°C/s)	0.1-1.0	10-200	> 1000
Tiempo de residencia (s)	300-550	0.5-10	< 1
Tamaño de partícula (mm)	5-50	< 1	< 0.5
Productos principales	Gases, carbón y bio aceite (alquitrán)	Bio aceite, gases y carbón.	Gases y Bio aceite.

Nota. Tomado de: Pandey, B., Prajapati, Y. K., & Sheth, P. N. (2019).

Como se evidencia en la tabla 3, la pirólisis instantánea se caracteriza por tener tasas de calentamiento extremadamente elevadas, que superan los 1000 °C por segundo, y suele llevarse con partículas de biomasa muy pequeñas, normalmente inferiores a 0.5 mm. Este tipo de pirólisis maximiza la producción de bio aceite e hidrógeno y minimiza la formación de biocarbón (Hu & Gholizadeh, 2019).

3.2.2 Variables del proceso

Temperatura de funcionamiento

La temperatura es un parámetro fundamental en el proceso de pirólisis para la conversión termoquímica de biomasa, ya que influye directamente en la producción de hidrógeno y determina tanto la proporción como la calidad de los productos obtenidos (Nguyen et al., 2024b). A continuación, se detallan los productos obtenidos a partir de la pirólisis de los principales componentes de la biomasa lignocelulósica, en función de los diferentes rangos de temperatura:

Tabla 4.

Temperaturas de descomposición y productos principales de los componentes de la biomasa durante la pirólisis.

Componente	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Productos principales
Celulosa	300	450	Volátiles, residuos aromáticos, gases (CO , CO_2 , H_2).
Hemicelulosa	200	350	Ácido acético, volátiles, aumento de gases a $> 350^\circ C$.
Lignina	200	500	Carbón, compuestos fenólicos, alta producción de biochar.

Nota. Datos adaptados del artículo Xun Hu y Mortaza Gholizadeh (2019).

Velocidad de calentamiento

La velocidad de calentamiento es un factor crucial en la degradación de la biomasa durante la pirólisis. Altas velocidades de calentamiento favorecen una descomposición rápida y reducen tiempos de residencia, lo que disminuye la incidencia de reacciones secundarias y favorece la formación de gases ligeros. En cambio, velocidades de calentamiento bajas aumentan la formación de biocarbón y alquitrán, limitando el rendimiento del hidrógeno (Aboelela et al., 2023).

Tiempo de residencia

El tiempo de residencia es un parámetro fundamental que afecta la composición y el rendimiento de los gases producidos. Tiempos de residencia prolongados promueven una mayor interacción del material volátil con el calor, lo que cual facilita la descomposición completa de los compuestos, incrementando la producción de hidrógeno (X. Li et al., 2024).

Tamaño de partícula

Un tamaño de partícula reducido en los procesos varían dependiendo del tipo de pirólisis que se quiera llevar a cabo ya que generalmente en el proceso de pirólisis lenta se maneja un

tamaño de partícula en un rango entre 5 y 50 mm, en la pirólisis rápida < 1 mm y en la pirólisis instantánea < 0.5 mm, lo cual tiene un efecto positivo en el rendimiento del gas hidrógeno debido a que mejora la transferencia de calor, acelera la conversión y maximiza la producción de gases, lo que da como resultado que el proceso sea óptimo y permite obtener un mayor rendimiento del hidrógeno (Pandey et al., 2019).

Tipo de biomasa

Aunque este proceso acepta diversos tipos de biomasa, la selección de la materia prima afecta significativamente la cantidad de hidrógeno producido mediante el proceso de pirólisis. La relación hidrógeno-carbono del material influye directamente en la capacidad de síntesis de hidrógeno durante la descomposición térmica. Para alcanzar resultados ideales, se prefieren las materias primas con una mayor concentración de hidrógeno y bajos niveles de humedad y cenizas, ya que estas últimas pueden inhibir las reacciones deseadas y generar más residuos sólidos. Además, una baja humedad reduce el consumo energético inicial, favoreciendo una conversión más eficiente de la biomasa en gases ricos en hidrógeno (Damian et al., 2024).

Catalizadores

Los catalizadores en la pirólisis de biomasa desempeñan importante ya que aceleran las reacciones químicas, favoreciendo la producción de gases ricos en hidrógeno al reducir la energía de activación y facilitando el craqueo de hidrocarburos, la gasificación del carbón residual y la conversión de alquitrán en productos más valiosos. Además, minimiza la producción de subproductos no deseados como el coque. Esto mejora la eficiencia y selectividad del proceso, promoviendo soluciones energéticas sostenibles y ecológicas (Akubo et al., 2019).

Tabla 5.

Catalizadores más utilizados en el proceso de pirólisis para la conversión de biomasa

Tipo de catalizador	Níquel	Hierro	Plata
Características	Alta actividad para el craqueo de hidrocarburos y conversión de alquitrán, mejora con promotores tales como Mg, Co, Ce, Cu y Fe.	Se utiliza en forma metálica o soportado en carbón activado y óxidos metálicos; promueve reformado de hidrocarburos y craqueo de alquitrán.	Las nanopartículas de plata actúan como buen catalizador en la desvolatilización primaria, favoreciendo el craqueo de los enlaces C-C y C-O, lo que da como resultado la generación de compuestos gaseosos en el proceso de pirólisis.
Ventajas	Mayor producción de hidrógeno y alta eficiencia catalítica.	Económico por su abundancia y no es tóxico.	Alta selectividad, actividad catalítica y eficiencia.
Desventajas	Se cataloga como tóxico y tiende a formar depósitos de carbón.	Sufre envenenamiento por azufre y es sensible a procesos de oxidación.	No es abundante en la naturaleza además de ser costoso.

Nota. Los datos de la tabla fueron tomados de múltiples fuentes: Níquel (Blanquet & Williams, 2021), Hierro(An et al., 2020), Plata(Saravana Sathiya Prabhahar et al., 2020).

3.4 Combustión

El proceso de combustión se aplica con frecuencia para convertir biomasa rica en lignina. A diferencia de la gasificación y de la pirólisis este método no es selectivo respecto a la materia prima y busca reducir el combustible a compuestos simples. Durante la combustión, la biomasa se transforma principalmente en dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O), junto con una pequeña

cantidad de otras especies, cuya formación depende de la composición de la biomasa y las condiciones del proceso, parte del oxígeno necesario para este proceso proviene de la propia biomasa, mientras que el resto se suministra mediante inyección al sistema. Por tal motivo, este proceso no es eficiente para la producción de hidrógeno, ya que genera principalmente CO₂ y agua, liberando cantidades mínimas de hidrógeno libre (Garba, 2020).

4. Avances y desafíos en las tecnologías termoquímicas de gasificación y pirólisis.

Las tecnologías termoquímicas, como la gasificación y la pirólisis, se presentan como opciones prometedoras para convertir biomasa de manera eficiente en hidrógeno y otros productos energéticos. Estas alternativas no solo utilizan recursos renovables, sino que también ayudan a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y a impulsar el desarrollo de una economía circular. No obstante, llevarlas a cabo a gran escala implica superar varios desafíos técnicos, económicos y ambientales para garantizar su viabilidad y sostenibilidad.

En esta sección se examinan los avances destacados que han permitido mejorar la eficiencia, flexibilidad y productividad de estos procesos, además de los retos que aún persisten, como la gestión de subproductos, los costos operativos y la integración de estas tecnologías. El objetivo de este análisis es ofrecer una perspectiva sobre las oportunidades y limitaciones de la gasificación y la pirólisis, subrayando su papel en la transición hacia un sistema energético sostenible.

4.1 Gasificación de biomasa: Avances recientes y principales desafíos en la producción de hidrógeno.

La conversión termoquímica de biomasa enfrenta una serie de desafíos en la producción de hidrógeno, que es un componente clave para lograr una transición energética sostenible. Uno de los pasos fundamentales en este proceso es la inversión en la exploración y desarrollo de catalizadores rentables. Estos catalizadores tienen el potencial de aumentar la producción de H₂, reducir la temperatura necesaria para la gasificación y promover el craqueo del alquitrán, un contaminante crítico en los sistemas de gasificación (Sansaniwal et al., 2017).

En el ámbito de los catalizadores, se ha observado un efecto sinérgico, donde la combinación de dos o más componentes genera un impacto mayor que la suma de sus efectos individuales. Este aspecto positivo hace énfasis en la necesidad de justificar y priorizar esfuerzos de investigación orientados al desarrollo y diseño de catalizadores más eficientes. Aunque la selectividad de los catalizadores ha mejorado considerablemente, los desafíos relacionados con su estabilidad y reciclabilidad persisten para su aplicación futura. Superar estos obstáculos es crucial para garantizar la viabilidad técnica y económica de la producción de hidrógeno a partir de biomasa (Cao et al., 2020b).

Otro factor determinante es el rendimiento de carbono durante el proceso de gasificación, especialmente considerando que la carbonización puede incrementar los costos de las materias primas. Hoy en día, la producción de hidrógeno a partir de biomasa sigue siendo limitada, lo que resalta la necesidad de participar en la producción de catalizadores de alta eficiencia que promuevan la competitividad y viabilidad de esta tecnología.

Además de los catalizadores, el proceso de gasificación enfrenta problemas asociados al consumo excesivo de energía y la corrosión en los sistemas. Estos desafíos se agravan en la gasificación con agua supercrítica, donde es crucial controlar los parámetros operativos basados en estudios termodinámicos y cinéticos de las reacciones de biomasa. Optimizar estos parámetros no solo mejoraría la eficiencia del proceso, sino también contribuiría a reducir costos operativos y ambientales (El-Emam & Özcan, 2019).

La implementación de la gasificación de biomasa a gran escala representa un desafío adicional, debido a la variabilidad temporal y la heterogeneidad espacial en las fuentes de biomasa residual. La gestión de la cadena de suministro de biomasa es clave en este contexto y se ve afectada por varios factores:

Disponibilidad de biomasa: La distribución y disponibilidad de biomasa no son uniformes geográfica ni temporalmente, lo que dificulta una provisión constante y confiable.

Altos costos de transporte: La baja densidad y alta humedad de la biomasa aumentan significativamente los costos logísticos.

Infraestructura insuficiente: Existe una falta de sistemas adecuados para la recolección, almacenamiento y transporte de biomasa, lo que limita su uso eficiente y sostenible.

Dado este panorama, se espera que futuros estudios incorporen métodos emergentes de procesamiento de datos para optimizar los sistemas de gasificación. Estos avances podrían incluir el desarrollo de modelos predictivos para la gestión de la cadena de suministro y el diseño de sistemas operativos adaptativos que se ajusten a las variaciones en la disponibilidad de biomasa. En conjunto, estas mejoras tienen el potencial de consolidar la gasificación de biomasa como una tecnología viable y competitiva en la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles (Risco-Bravo et al., 2024).

4.2 Pirólisis de biomasa: Avances recientes y principales desafíos en la producción de hidrógeno.

Para alcanzar una producción de energía más limpia y eficiente, los avances e investigaciones actuales en el campo de la pirólisis están orientados a optimizar este proceso y facilitar su integración en el panorama energético mundial. Entre estas innovaciones, están las tecnologías que aún se encuentran en etapas iniciales de desarrollo, como la pirólisis solar, que busca aprovechar la energía solar para llevar a cabo este proceso, ya que el pirólisis tradicional requiere un alto aporte de energía externa, lo que implica el uso de carbón o combustibles fósiles, generando altas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Por otro lado, se ha avanzado en el estudio de la copirólisis de múltiples materias primas, una técnica que consiste en combinar biomasa y plásticos con el fin de mejorar los rendimientos de los productos obtenidos. Según Liu et al. (2022), al aplicar la copirólisis a una mezcla de neumáticos de desecho y corteza de pino, lograron un rendimiento de gas del 45%. Sin embargo, la producción de hidrógeno (H_2) fue limitada, alcanzando solo un 2%, y solo ocurrió cuando se procesó de forma individual la corteza de pino, lo que evidencia la falta de sinergia entre ambas materias primas, esta técnica ha sido evaluada bajo diferentes parámetros y condiciones, pero la mayoría de los experimentos han tenido como resultado principal la obtención de bioaceite. A continuación, se presentan dos avances tecnológicos de forma detallada en el ámbito de la pirólisis para la producción de hidrógeno a partir de biomasa. Aunque ambos se encuentran en fase de investigación, han comenzado a adquirir mayor relevancia en comparación con los otros dos mencionados:

4.2.1 Uso de CaO para la captura de CO₂ en el proceso de pirólisis para la producción de hidrógeno.

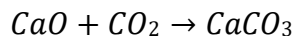
El proceso de conversión termoquímica de biomasa mediante pirólisis con captura integrada de CO₂ utiliza óxido de calcio (CaO) como sorbente. Este compuesto desempeña dos funciones principales: la captura de CO₂ y la optimización de la producción de hidrógeno. Además, presenta diversas ventajas, entre ellas su estabilidad térmica, rentabilidad, facilidad de disposición y compatibilidad ambiental. El principal producto de reacción es el carbonato de calcio (CaCO₃), un compuesto estable y no tóxico, lo que facilita su eliminación o reutilización. Sin embargo, el sorbente de CaO tiene ciertas limitaciones, como su susceptibilidad a la sinterización durante ciclos repetidos de carbonización y descarbonización, lo que reduce progresivamente su capacidad de adsorción. Para abordar este problema, se han implementado modificaciones en su composición, como la incorporación de soportes inertes basados en elementos como aluminio (Al), magnesio (Mg), circonio (Zr) y materiales bifuncionales. Estas modificaciones han demostrado mejorar la resistencia del sorbente de CaO a la sinterización, prolongando su vida útil y eficacia en el proceso (Wang et al., 2025).

Existen dos tipos de procesos principales que emplean el sorbente de CaO: el proceso in situ y el ex situ, los cuales han demostrado ser eficientes al momento de capturar CO₂ y purificar el resultado final de los gases, entre los cuales se encuentra el H₂.

Proceso in situ

En el proceso in situ, la biomasa pasa primero por operaciones de preparación como trituración, molienda y secado, dependiendo del tipo de biomasa utilizada. Posteriormente, la biomasa tratada se mezcla directamente con CaO. Esta mezcla se introduce en un reactor donde

ocurre la descomposición térmica. Durante el proceso, se liberan gases ricos en CO₂, que reaccionan con el CaO generando la siguiente reacción:



De acuerdo con el estudio de Quan et al. (2023), una relación 1:1 entre biomasa en este caso lodo de carbón y CaO ha demostrado ser óptima a una temperatura de 600 °C, logrando capturar el 92.1% del CO₂ y obteniendo una concentración de H₂ del 56.5%.

Proceso ex situ

En el proceso ex situ, el reactor está dividido en dos zonas. En la primera zona, conocida como la zona de pirólisis, la biomasa previamente tratada se somete a temperaturas entre 500 y 800 °C. Durante este paso, la biomasa genera un flujo de gases compuesto por CO₂, H₂, CO y CH₄, estos gases son transportados mediante un flujo de gas portador que generalmente es nitrógeno. En la segunda zona, denominada zona de captura de CO₂, el gas portador transporta los gases hacia un lecho de CaO, que opera a temperaturas entre 500 y 700 °C. En esta etapa, el CO₂ reacciona con el CaO para formar carbonato de calcio (CaCO₃).

Finalmente, los gases restantes, principalmente ricos en H₂, se almacenan como productos. En este proceso la captura de CO₂ por CaO ayuda a romper los enlaces –CH₄ y –CH₃, promoviendo el ascenso de H₂, en este caso a una temperatura de 600 °C se logró la captura del CO₂ del 74% y una concentración de H₂ del 59.3% (Quan et al., 2023)

Según Quan et al. (2023), tanto en la captura in situ como en la ex situ, el rendimiento de gas varía con la tasa de captura de CO₂. Además, se observa un efecto inhibitorio de la adsorción de CO₂ en CaO a temperaturas más altas, lo que se atribuye a la desorción de CaCO₃ y al debilitamiento de los enlaces químicos del material, además de ser un proceso relativamente nuevo al cual le hace falta más etapas de estudio para poder implementarlo a nivel industrial.

4.2.2 Plasma para pirólisis de biomasa.

El plasma, el cuarto estado de la materia, se presenta como una tecnología innovadora en los procesos de conversión termoquímica para la producción de hidrógeno junto con otros productos de valor añadido como biochar, bioaceites y compuestos aromáticos. Su alta reactividad lo hace ideal para reacciones químicas específicas, gracias a las altas temperaturas que alcanza. El plasma puede clasificarse en térmico y no térmico, dependiendo de la temperatura y el grado de ionización. En ambos casos, su energía oscila entre 1 a 10 electronvoltios (eV) ($1 \text{ eV} = 10^4 \text{ K}$), suficiente para romper enlaces moleculares mediante colisiones, provocando el fenómeno de ionización, la disociación molecular y la excitación atómica (Elhambakhsh et al., 2023a).

En la pirólisis de biomasa, el plasma ofrece ventajas significativas como la ruptura rápida de enlaces C-H, hidroxilo de alcohol, enlace glucosídico y enlace epoxi. Lo cual genera como resultado la liberación de una gran cantidad de H_2 y CO. Además, transforma el CO_2 en compuestos oxigenados que se adhieren al carbón y posteriormente se convierten en CO, reduciendo las emisiones de CO_2 , manteniendo el biochar altamente activo y menos gráfico (D. Zhao et al., 2024a).

4.2.2.1 Clasificación del plasma en la pirólisis para la producción de hidrógeno a partir de biomasa

Plasma térmico

Este tipo de plasma opera a temperaturas extremadamente altas, entre 3,000 y 10,000 °C, lo que permite la ionización completa del gas y una descomposición rápida y eficiente de compuestos complejos como alquitrán. Además, el plasma térmico genera productos de alta pureza, como el hidrógeno (Elhambakhsh et al., 2023a). Este proceso es altamente flexible, fácilmente controlable, requiere menos tiempo de operación y presenta altos niveles de productividad con rendimientos óptimos además de procesar diversos tipos de biomasa (Inayat et al., n.d.).

Pirólisis de plasma no térmico para la producción de hidrógeno a partir de biomasa

El plasma no térmico opera a temperaturas más bajas, generalmente entre 20 y 400 °C, lo que reduce el consumo energético en comparación con el plasma térmico y permite un control más preciso sobre los productos obtenidos. Sin embargo, para mejorar su eficiencia, requiere el uso de catalizadores, como óxidos metálicos (NiO, CoO), que optimizan la cantidad de hidrógeno en los productos finales y minimizan el contenido de oxígeno en los gases generados (Inayat et al., n.d.).

Ventajas y limitaciones

En términos generales, la tecnología del plasma tiene el potencial de para contribuir a la conversión de biomasa en hidrógeno (H_2). Esto se debe a su capacidad para ofrecer una mayor productividad, acelerar las reacciones químicas gracias a su rápida cinética, minimizar la formación de alquitrán y garantizar productos de calidad, todo ello utilizando una amplia variedad de tipos de biomasa, como la biomasa lignocelulosa y la biomasa de algas (Elhambakhsh et al., 2023).

El uso de plasma en el proceso de pirólisis incrementa la producción de hidrógeno hasta 200 veces en comparación con la pirólisis convencional. Esto se debe a su capacidad para facilitar la ruptura de enlaces C-H, reducir la generación de subproductos y minimizar las emisiones de

CO₂ (D. Zhao et al., 2024b). No obstante, esta tecnología presenta limitaciones importantes, el plasma térmico requiere una cantidad significativa de energía eléctrica, lo que implica elevados costos operativos, mientras que el plasma no térmico, aunque es más eficiente energéticamente, depende de catalizadores que incrementan los costos y complican su viabilidad económica a gran escala (Inayat et al., n.d).

5. Matrices de priorización de los procesos de conversión termoquímicas para la producción de hidrógeno a partir de biomasa.

Con el objetivo de evaluar y comparar los procesos de pirólisis, gasificación y combustión para la producción de hidrógeno a partir de biomasa, se desarrollaron las tablas (6 y 7), que corresponden a la matriz de priorización. En esta matriz se analiza cada tecnología en función de criterios, como, costo, seguridad, sostenibilidad, tecnología y eficiencia con el propósito de identificar la opción termoquímica más adecuada en este caso.

En la tabla 6, a cada parámetro se le asignó una ponderación en un rango de 0 a 0.3, sumando un valor total de 1. Posteriormente, en la tabla 7, el valor total de cada tecnología se calculó multiplicando los valores ponderados de la tabla 6 por los valores asignados a cada criterio de la tabla 7. Como resultado, se obtuvieron las siguientes calificaciones: 3.8 para gasificación, 3.6 para pirólisis y 2.0 para combustión, siendo la gasificación la tecnología con la puntuación más alta y, por ende, la más adecuada para la aplicación requerida en este proyecto.

Tabla 6.

Ponderación para selección de tecnologías termoquímicas para la producción de hidrogeno

Costos	Seguridad	Sostenibilidad	Tecnología	Eficiencia
0.2	0.2	0.2	0.1	0.3

Tabla 7.

Matriz de priorización de tecnologías termoquímicas para la producción de biomasa

	Costos		Seguridad		Sostenibilidad		Tecnología		Eficiencia		Total
	Valor	Final	Valor	Final	Valor	Final	Valor	Final	Valor	Final	
Gasificación	1	0.2	4	0.8	4	0.8	5	0.5	5	1.5	3.8
Pirólisis	1	0.2	4	0.8	5	1	4	0.4	4	1.2	3.6
Combustión	3	0.6	2	0.4	1	0.2	2	0.2	2	0.6	2

6. Conclusiones

Se identificó que la producción de hidrógeno a partir de la conversión termoquímica de biomasa tiene el potencial de transformarse en un pilar fundamental de un futuro energético sostenible. Esta tecnología no solo puede satisfacer la creciente demanda de energía global, sino que también busca aprovechar los recursos renovables de manera eficiente y responsable, fomentando la transición hacia economías circulares y reduciendo las emisiones de carbono.

Se destacó el proceso de pirólisis debido a su capacidad para adaptarse a una amplia variedad de materias primas en la producción de hidrógeno a partir de biomasa. A pesar de los desafíos que limitan su implementación a nivel industrial, la alta inversión inicial y generación de subproductos como el alquitrán, los avances recientes han mejorado la eficiencia del proceso y la calidad del gas producido.

La gasificación de biomasa es una tecnología con alto potencial para la producción de hidrógeno verde, ofreciendo destacados beneficios ambientales como la reducción de emisiones de CO₂, donde la creación de bases de datos y estudios comparativos sobre catalizadores y tecnologías innovadoras, será fundamental para diseñar procesos sostenibles, posicionando a la gasificación de biomasa como una alternativa importante en la transición hacia la producción industrial de hidrógeno verde y la descarbonización global.

Se identificó que los procesos termoquímicos para la producción de hidrógeno a partir de biomasa requieren más investigación ya que se encuentran en fases experimentales, como es el caso de la pirólisis instantánea y de plasma que en sus primeras fases de desarrollo han demostrado potencial para producir hidrógeno de forma eficiente mientras que el uso de CaO para la captura de CO₂ se han obtenido gases con un menor porcentaje de impurezas. Por otra parte, la gasificación

presenta problemas de eficiencia a nivel industrial, por ende, se ha priorizado la necesidad de optimizar las etapas del proceso en sí, específicamente los gasificadores y catalizadores, demandando investigación para disminuir los costos y aumentar producción de hidrogeno a gran escala.

Referencias

- Aboelela, D., Saleh, H., Attia, A. M., Elhenawy, Y., Majozi, T., C Bassyouni, M. (2023). Recent Advances in Biomass Pyrolysis Processes for Bioenergy Production: Optimization of Operating Conditions. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 15, Issue 14). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/su151411238>
- Ahmad, S., Ullah, A., Samreen, A., Qasim, M., Nawaz, K., Ahmad, W., Alnaser, A., Kannan, A. M., C Egilmez, M. (2024). Hydrogen production, storage, transportation and utilization for energy sector: A current status review. In *Journal of Energy Storage* (Vol. 101). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113733>
- Akbarian, A., Andooz, A., Kowsari, E., Ramakrishna, S., Asgari, S., C Cheshmeh, Z. A. (2022). Challenges and opportunities of lignocellulosic biomass gasification in the path of circular bioeconomy. In *Bioresource Technology* (Vol. 362). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127774>
- Akubo, K., Nahil, M. A., C Williams, P. T. (2019). Pyrolysis-catalytic steam reforming of agricultural biomass wastes and biomass components for production of hydrogen/syngas. *Journal of the Energy Institute*, 52(6), 1987-1996. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.10.013>
- An, Y., Tahmasebi, A., Zhao, X., Matamba, T., C Yu, J. (2020). Catalytic reforming of palm kernel shell microwave pyrolysis vapors over iron-loaded activated carbon: Enhanced production of phenol and hydrogen. *Bioresource Technology*, 30c. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123111>
- Ashfaq, M. M., Bilgic Tüzemen, G., C Noor, A. (2024). Exploiting agricultural biomass via thermochemical processes for sustainable hydrogen and bioenergy: A critical review. In *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 84, pp. 1068-1084). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.08.295>
- Bisen, D., Chouhan, A. P. S., Pant, M., C Chakma, S. (2025). Advancement of thermochemical conversion and the potential of biomasses for production of clean energy: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 208). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115016>
- Blanquet, E., C Williams, P. T. (2021). Biomass pyrolysis coupled with non-thermal plasma/catalysis for hydrogen production: Influence of biomass components and catalyst properties. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 155. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105325>
- Cao, L., Yu, I. K. M., Xiong, X., Tsang, D. C. W., Zhang, S., Clark, J. H., Hu, C., Ng, Y. H., Shang, J., C Ok, Y. S. (2020a). Biorenewable hydrogen production through biomass gasification: A review and future prospects. *Environmental Research*, 18c. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109547>

- Cao, L., Yu, I. K. M., Xiong, X., Tsang, D. C. W., Zhang, S., Clark, J. H., Hu, C., Ng, Y. H., Shang, J., C Ok, Y. S. (2020b). Biorenewable hydrogen production through biomass gasification: A review and future prospects. *Environmental Research*, 18c. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109547>
- El-Emam, R. S., C Özcan, H. (2019). Comprehensive review on the techno-economics of sustainable large-scale clean hydrogen production. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 220, pp. 593-609). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.309>
- Elhambakhsh, A., Van Duc Long, N., Lamichhane, P., C Hessel, V. (2023a). Recent progress and future directions in plasma-assisted biomass conversion to hydrogen. In *Renewable Energy* (Vol. 218). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119307>
- Elhambakhsh, A., Van Duc Long, N., Lamichhane, P., C Hessel, V. (2023b). Recent progress and future directions in plasma-assisted biomass conversion to hydrogen. In *Renewable Energy* (Vol. 218). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119307>
- Gao, Y., Wang, M., Raheem, A., Wang, F., Wei, J., Xu, D., Song, X., Bao, W., Huang, A., Zhang, S., C Zhang, H. (2023). Syngas Production from Biomass Gasification: Influences of Feedstock Properties, Reactor Type, and Reaction Parameters. In *ACS Omega* (Vol. 8, Issue 35, pp. 31620-31631). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c03050>
- Garba, A. (2020). *Biomass Conversion Technologies for Bioenergy Generation: An Introduction*. www.intechopen.com
- Hassan, Q., Abdulateef, A. M., Hafedh, S. A., Al-samari, A., Abdulateef, J., Sameen, A. Z., Salman, H. M., Al-Jiboory, A. K., Wieteska, S., C Jaszczur, M. (2023). Renewable energy-to-green hydrogen: A review of main resources routes, processes and evaluation. In *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 48, Issue 46, pp. 17383-17408). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.175>
- Hu, X., C Gholizadeh, M. (2019). Biomass pyrolysis: A review of the process development and challenges from initial researches up to the commercialisation stage. In *Journal of Energy Chemistry* (Vol. 39, pp. 109-143). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2019.01.024>
- Inayat, A., Tariq, R., Khan, Z., Ghenai, C., Kamil, M., Jamil, F., C Shanableh, A. (n.d.-a). A comprehensive review on advanced thermochemical processes for bio-hydrogen production via microwave and plasma technologies. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01175-1>/Published
- Inayat, A., Tariq, R., Khan, Z., Ghenai, C., Kamil, M., Jamil, F., C Shanableh, A. (n.d.-b). A comprehensive review on advanced thermochemical processes for bio-hydrogen production via microwave and plasma technologies. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01175-1>/Published
- Jin, K., Ji, D., Xie, Q., Nie, Y., Yu, F., C Ji, J. (2019). Hydrogen production from steam gasification of tableted biomass in molten eutectic carbonates. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(41), 22919-22925. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.033>

- Li, B., Yang, H., Wei, L., Shao, J., Wang, X., C Chen, H. (2017). Hydrogen production from agricultural biomass wastes gasification in a fluidized bed with calcium oxide enhancing. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(8), 4832-4839. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.138>
- Li, X., Cen, K., Li, J., Wang, C., Jia, D., C Chen, D. (2024). Effects of co-pyrolysis interaction performance of cellulose and lignin on the gas products and hydrogen generation path. *Industrial Crops and Products*, 222. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119858>
- Nguyen, V. G., Nguyen-Thi, T. X., Phong Nguyen, P. Q., Tran, V. D., Ağbulut, Ü., Nguyen, L. H., Balasubramanian, D., Tarelko, W., A. Bandh, S., C Khoa Pham, N. D. (2024a). Recent advances in hydrogen production from biomass waste with a focus on pyrolysis and gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 54, 127-160. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.049>
- Nguyen, V. G., Nguyen-Thi, T. X., Phong Nguyen, P. Q., Tran, V. D., Ağbulut, Ü., Nguyen, L. H., Balasubramanian, D., Tarelko, W., A. Bandh, S., C Khoa Pham, N. D. (2024b). Recent advances in hydrogen production from biomass waste with a focus on pyrolysis and gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 54, 127-160. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.049>
- Pal, D. B., Singh, A., C Bhatnagar, A. (2022). A review on biomass based hydrogen production technologies. In *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 47, Issue 3, pp. 1461-1480). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.124>
- Pandey, B., Prajapati, Y. K., C Sheth, P. N. (2019). Recent progress in thermochemical techniques to produce hydrogen gas from biomass: A state of the art review. In *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 44, Issue 47, pp. 25384-25415). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.031>
- Papa, A. A., Bartolucci, L., Cordiner, S., Di Carlo, A., Mele, P., Mulone, V., C Vitale, A. (2024). The effect of pyrolysis temperature on the optimal conversion of residual biomass to clean syngas through fast-pyrolysis/steam gasification integration. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.09.100>
- Quan, C., Hu, Y., Guo, A., C Gao, N. (2023). Characteristics of coal slime pyrolysis with integrated CO₂ capture. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 175. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106218>
- Ramos, A., Monteiro, E., Silva, V., C Rouboa, A. (2018). Co-gasification and recent developments on waste-to-energy conversion: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 81, pp. 380-398). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.025>
- Risco-Bravo, A., Varela, C., Bartels, J., C Zondervan, E. (2024). From green hydrogen to electricity: A review on recent advances, challenges, and opportunities on power-to-hydrogen-to-power systems. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 189). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113930>
- Rubinsin, N. J., Karim, N. A., Timmiati, S. N., Lim, K. L., Isahak, W. N. R. W., C Pudukudy, M. (2024). An overview of the enhanced biomass gasification for hydrogen production. In *International*

- Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 49, pp. 1139-1164). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.043>
- Sansaniwal, S. K., Rosen, M. A., C Tyagi, S. K. (2017). Global challenges in the sustainable development of biomass gasification: An overview. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 80, pp. 23-43). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.215>
- Saravana Sathiya Prabhakar, R., Nagaraj, P., C Jeyasubramanian, K. (2020). Promotion of bio oil, H₂ gas from the pyrolysis of rice husk assisted with nano silver catalyst and utilization of bio oil blend in CI engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(33), 16355-16371.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.123>
- Sikiru, S., Oladosu, T. L., Amosa, T. I., Olutoki, J. O., Ansari, M. N. M., Abioye, K. J., Rehman, Z. U., C Soleimani, H. (2024). Hydrogen-powered horizons: Transformative technologies in clean energy generation, distribution, and storage for sustainable innovation. In *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 56, pp. 1152-1182). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.12.186>
- Taipabu, M. I., Viswanathan, K., Wu, W., Hattu, N., C Atabani, A. E. (2022). A critical review of the hydrogen production from biomass-based feedstocks: Challenge, solution, and future prospect. In *Process Safety and Environmental Protection* (Vol. 164, pp. 384-407). Institution of Chemical Engineers. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.06.006>
- Valizadeh, S., Hakimian, H., Farooq, A., Jeon, B. H., Chen, W. H., Hoon Lee, S., Jung, S. C., Won Seo, M., C Park, Y. K. (2022). Valorization of biomass through gasification for green hydrogen generation: A comprehensive review. *Bioresour. Technol.*, 355.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128143>
- Wang, Y., Veksha, A., Ong, J., Ueki, Y., Yoshiie, R., Naruse, I., C Lisak, G. (2025). The role of post-pyrolysis carbon dioxide capture in hydrogen recovery from waste-derived pyrolysis gas. *Fuel*, 381. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133293>
- Yong, Y. S. and R. R. A. (2022). Process simulation of hydrogen production through biomass gasification: Introduction of torrefaction pre-treatment. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(Elsevier), 42040-42050.
- Zainal, B. S., Ker, P. J., Mohamed, H., Ong, H. C., Fattah, I. M. R., Rahman, S. M. A., Nghiem, L. D., C Mahlia, T. M. I. (2024). Recent advancement and assessment of green hydrogen production technologies. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 189). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113941>
- Zhao, D., Liang, Y., Gou, L., Cui, Y., Wang, H., Wang, C., Liu, H., Guo, S., C Li, S. (2024a). The mechanism of plasma affecting biomass pyrolysis to more H₂, activated char and less CO₂. *Chemical Engineering Journal*, 502. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.157923>
- Zhao, D., Liang, Y., Gou, L., Cui, Y., Wang, H., Wang, C., Liu, H., Guo, S., C Li, S. (2024b). The mechanism of plasma affecting biomass pyrolysis to more H₂, activated char and less CO₂. *Chemical Engineering Journal*, 502. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.157923>

Zhao, S., Yang, P., Liu, X., Zhang, Q., C Hu, J. (2020). Synergistic effect of mixing wheat straw and lignite in co-pyrolysis and steam co-gasification. *Bioresource Technology*, 302. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122876>