

Producción de hidrógeno verde a partir biomasa residual: una vigilancia tecnológica

Hasbleidy Katherine Porras Fajardo

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Química

Modalidad Trabajo de Investigación

Director:

Cesar Augusto Guevara Lastre

Ingeniero químico

Codirector:

Omar Andrés Benavides Prada

Ingeniero químico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2024

Tabla de contenido

Introducción	9
1. Estado del arte	11
2. Objetivos.....	13
2.1 Objetivo general	13
2.2 Objetivos específicos.....	13
3. Metodología.....	14
3.1 Elección motores de búsqueda y formulación palabras clave	15
3.2 Selección de la información	15
3.3 Análisis bibliométrico	16
3.4 Reconocimiento de los avances y desafíos.....	17
4 Resultados y discusión	18
4.1 Ecuaciones de búsqueda: resultados protocolo PRISMA	18
4.2 Análisis bibliométrico	19
4.3 Procesos de producción de H ₂ a partir de biomasa residual.....	22
4.3.1 <i>Tipo de biomasa residual</i>	23
4.3.2 <i>Técnicas termoquímicas</i>	24
4.3.3 Métodos no convencionales	39
4.3.4 <i>Desafíos y análisis TRL</i>	44

5	Conclusiones	47
6	Recomendaciones	49
	Referencias bibliográficas.....	50
	Apéndices.....	66

Lista de tablas

Tabla 1 Criterios de inclusión y exclusión empleados en la revisión sistemática.	15
Tabla 2 Ecuación y resultados obtenidos por cada motor de búsqueda.	18
Tabla 3 Revistas más citadas sobre la producción de H ₂ a partir de biomasa residual.	21
Tabla 4 Análisis final y próximo del porcentaje en peso de diversas biomasa.	23
Tabla 5 Reacciones básicas de la gasificación de biomasa.	25
Tabla 6 Comparación de diferentes formas de gasificación y su rendimiento de producción de H ₂	27
Tabla 7 Diferentes tipos de catalizador y rendimiento en la producción de H ₂	28
Tabla 8 Comparación de diferentes tipos de pirólisis y sus rendimientos.	31
Tabla 9 Comparación de diferentes tipos de fermentación y sus condiciones de máximo rendimiento de H ₂	41
Tabla 10 Niveles TRL de diferentes tecnologías para la producción de hidrógeno verde.	44

Lista de figuras

Figura 1 Ruta metodológica empleada	14
Figura 2 Diagrama de flujo método PRISMA.....	19
Figura 3 Número de artículos totales por a) cada base de datos. b) Países con más publicaciones incluidas en la revisión.....	20
Figura 4 Mapa sobre la relación entre palabras clave de los artículos seleccionados.	22
Figura 5 Sistema de pirólisis de lecho Fijo asistido por campo magnético.	33
Figura 6 Sistema gasificación en dos etapas.....	35
Figura 7 Configuración sistema D para la combinación de la fermentación oscura y una celda galvánica	43

Apéndices

Apéndice A. Items metodología PRISMA 66

Apéndice B. Niveles de maduración tecnológica TRL 69

Resumen

Título: Producción de hidrógeno verde a partir biomasa residual: una vigilancia tecnológica *

Autores: Porras Fajardo Hasbleidy Katherine **

Palabras clave: Hidrógeno verde, Biomasa residual, Tecnologías, gasificación, H₂

Descripción: En la actualidad, existe una creciente preocupación por el uso eficiente de recursos en la producción de energía para satisfacer las necesidades globales dada la combinación del crecimiento mundial, la demanda de energía y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. En este contexto, la producción de hidrógeno como fuente de energía renovable se ha destacado debido a su alto poder calorífico, naturaleza no contaminante y su contribución a un entorno limpio y seguro. El empleo de biomasa residual en la generación de hidrógeno verde ha suscitado un gran interés, ya que se contempla como una alternativa para reemplazar los combustibles fósiles y avanzar hacia una economía circular. En este estudio, se llevó a cabo una revisión sistemática de la literatura mediante la metodología PRISMA, con el propósito de identificar las tecnologías que se han investigado a lo largo de los años para mejorar la producción de H₂. Se evidenció que la gasificación de biomasa ha sido una de las tecnologías más estudiadas y ha experimentado avances significativos, como la incorporación de otros procesos, como la pirólisis y la fermentación oscura, para reducir los residuos no deseados del proceso y aumentar el rendimiento en la síntesis de H₂ en el gas síntesis. Además, se evaluó el nivel de madurez de estas tecnologías utilizando el análisis TRL (*technology readiness levels*), y se observó que las tecnologías se encuentran en un nivel 4 a 5 lo que indica que han pasado por pruebas en entornos de laboratorio y se han desarrollado prototipos funcionales.

*Trabajo de investigación – Pregrado en ingeniería química

**Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de ingeniería química.

Director: Cesar Augusto Guevara Lastre. Codirector: Omar Andrés Benavides Prada

Abstract

Title: Production of green hydrogen from waste biomass: a technology watch *

Authors: Porras Fajardo Hasbleidy Katherine**

Keywords: Green hydrogen, Residual biomass, Technologies, gasification, H₂

Description: Today, there is growing concern about the efficient use of resources in energy production to meet global needs given the combination of world growth, energy demand and the need to reduce greenhouse gas emissions. In this context, hydrogen production as a renewable energy source has been highlighted due to its high calorific value, non-polluting nature and its contribution to a clean and safe environment. The use of residual biomass in the generation of green hydrogen has aroused great interest, as it is contemplated as an alternative to replace fossil fuels and move towards a circular economy. In this study, a systematic literature review was carried out using PRISMA methodology, with the purpose of identifying the technologies that have been investigated over the years to improve H₂ production. It was evidenced that biomass gasification has been one of the most studied technologies and has undergone significant advances, such as the incorporation of other processes, such as pyrolysis and dark fermentation, to reduce unwanted process residues and increase the efficiency of H₂ synthesis in synthesis gas. In addition, the maturity level of these technologies was assessed using TRL (technology readiness levels) analysis, and it was observed that the technologies are at level 4 to 5 indicating that they have undergone testing in laboratory environments and functional prototypes have been developed.

*Research work – Undergraduate in Chemical Engineering

**Faculty of Physicochemical Engineering. School of chemical engineering.

Director: Cesar Augusto Guevara Lastre. Co-director: Omar Andrés Benavides Prada

Introducción

En la actualidad, la demanda energética y la sostenibilidad medioambiental son desafíos globales clave, siendo la producción de hidrógeno una importante área de enfoque en la búsqueda de fuentes de energía renovable (Wei *et al.*, 2021). Dicha sustancia es atractiva debido a que es un vector energético de alto poder calorífico, no contaminante, limpio, seguro y amigable con el ambiente, pero rara vez se encuentra en su forma pura (Buffi *et al.*, 2021). Además, aproximadamente el 95 % de su producción se realiza a partir de combustibles fósiles, mientras que solo un 4 % proviene de la electrólisis del agua y un 1 % de la biomasa residual; sin embargo, las dos primeras fuentes son opciones consideradas menos favorables para la economía circular, ya que no se alinean adecuadamente con los objetivos de desarrollo sostenible (Wei *et al.*, 2021).

Por otra parte, la biomasa residual es un material que se genera como subproducto de otras actividades. Los desechos utilizados en procesos para la producción de hidrógeno verde como la gasificación, pirólisis y fermentación provienen, en su mayoría, de residuos agrícolas como restos de cultivos cosechados, estiércol de vaca y cáscara de palmiste; además de madera como aserrín y cortezas, y subproductos agroindustriales, que incluyen residuos de frutas y lignina Kraft. (Bolívar *et al.*, 2022)

Respecto a los métodos para la producción de hidrógeno están los termoquímicos: pirólisis y gasificación, los cuales requieren mayor suministro de calor, pero presentan tiempos de conversión más cortos (Purnami *et al.*, 2021). Dentro de las técnicas no convencionales para la obtención de biohidrógeno (combustible con 0 emisiones) se tienen la fotofermentación y la fermentación oscura, presentando menor costo energético y requerimiento de agua, pero mayores tiempos de conversión; sin embargo, son más fáciles de escalar ya que funcionan en condiciones termodinámicas estándar (Murugaiyan *et al.*, 2022).

En este orden de ideas, mediante el uso de la metodología PRISMA se identifican las tendencias y los desafíos que enfrenta la investigación sobre la producción de hidrógeno verde a partir de la biomasa residual. La importancia de llevar a cabo esta revisión sistemática radica en su contribución al conocimiento actual, al proporcionar una visión completa y actualizada de las tendencias y desafíos en este campo de investigación, lo que permitirá promover avances significativos en la producción de hidrógeno verde de manera sostenible a partir de recursos naturales. Esta investigación se centra en abordar la siguiente pregunta: *¿Qué viabilidad tecnológica tienen los métodos para la obtención de hidrógeno verde a partir de biomasa residual?*

1. Estado del arte

En los últimos años se han llevado a cabo trabajos de vigilancia tecnológica en la escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander, los cuales permiten establecer una metodología adecuada para cumplir con los propósitos de la investigación. En dichos trabajos se llevaron a cabo revisiones sistemáticas de la literatura utilizando la metodología PRISMA, que consta de 27 ítems agrupados en 7 etapas: formulación de la pregunta de investigación, búsqueda de artículos, selección de estudios, extracción de datos, análisis de datos y presentación de resultados preliminares (Matthew *et al.*, 2021). Frank, *et al.* (2022) concluyeron que los óxidos e hidróxidos de metales y los materiales carbonosos son altamente efectivos para eliminar nitratos y fosfatos en aguas residuales, destacando su fácil disponibilidad. Torres, *et al.* (2022) identificaron recubrimientos híbridos como alternativas a los envases plásticos de alimentos, y concluyeron que la tecnología sobresaliente fue el sol-gel, que utiliza redes de sílice para preservar los productos alimenticios. Por su parte, Sierra, *et al.* (2022) realizaron una vigilancia científica sobre la protección contra la corrosión en la industria petroquímica, concluyendo que la literatura aboga por recubrimientos multifuncionales y respetuosos con el medio ambiente, empleando estrategias como el dopaje directo y micro/nanopartículas.

Por otra parte, varias revisiones centradas en la producción de biohidrógeno han explorado diversas tecnologías y los desafíos inherentes a la generación de este gas combustible. Ghodke, *et al.* (2023) han destacado que la gasificación de biomasa tiene el potencial de ser una tecnología prometedora para la producción de hidrógeno, aunque se enfrenta a obstáculos significativos en forma de altos costos de catalizadores y requisitos de instalaciones industriales para su viabilidad a escala industrial, mientras que Song, *et al.* (2022) y Cao, *et al.* (2020) han mostrado el rendimiento de las tecnologías termoquímicas como la gasificación y la pirólisis, señalando la

necesidad de abordar desafíos técnicos pendientes como la optimización de las condiciones de operación de la gasificación, la selección de materiales adecuados y el desarrollo de catalizadores más eficaces.

En lo referente a la producción de biohidrógeno a partir del bagazo de caña (BGA), Zhu, *et.al.* (2017) y Huang, *et.al.* (2022), realizaron estudios encaminados en el uso de bacterias termófilas como *Thermoanaerobacterium thermosaccharolyticum* y *T. thermosaccharolyticum*. Así mismo, algunos trabajos han demostrado el potencial de producción de hidrógeno utilizando diferentes métodos: Cao, *et.al.*, (2018) investigaron la gasificación del bagazo de caña de azúcar en agua súper crítica, y Prakash, *et.al.*, (2023) desarrollaron un método termoquímico, llamado volatilización instantánea reactiva (RFV), para producir gas de síntesis rico en hidrógeno a partir de la biomasa residual de la caña de azúcar.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Elaborar una revisión sistemática de los métodos de producción de hidrógeno verde a partir de biomasa residual.

2.2 Objetivos específicos

Implementar el protocolo PRISMA para establecer criterios de selección, clasificación y análisis de la información.

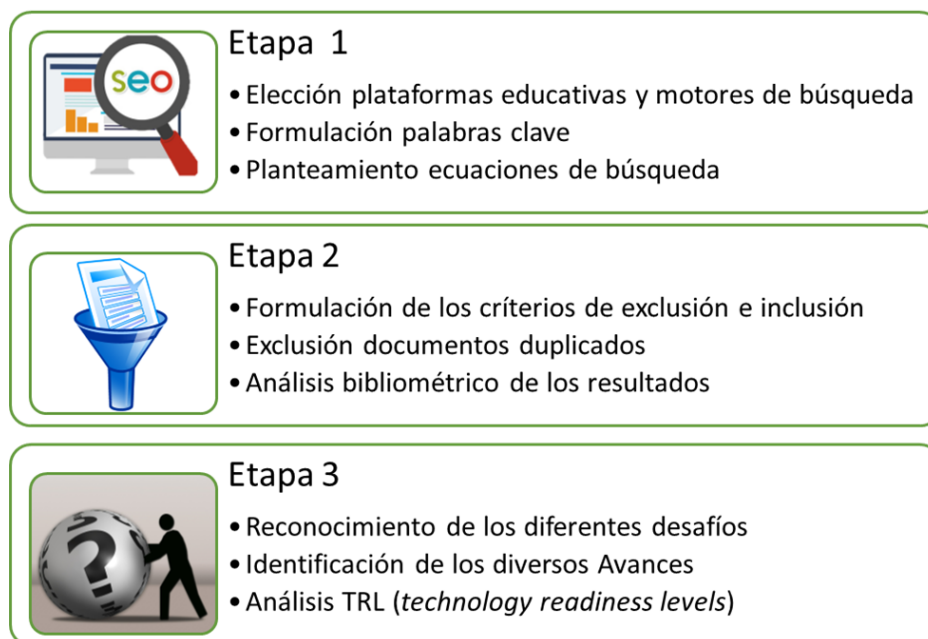
Desarrollar un análisis bibliométrico sobre los avances tecnológicos para la producción de hidrógeno verde.

Identificar los desafíos actuales de la producción de hidrogeno verde a partir la biomasa residual.

3. Metodología

Este estudio sistemático se realizó siguiendo las directrices de la declaración PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), que consta de 27 ítems (ver Apéndice A) agrupados en 7 etapas: formulación de la pregunta de investigación, búsqueda de artículos, selección de estudios, extracción de datos, análisis de riesgo de sesgo, análisis de datos y presentación de resultados preliminares. Dichas etapas están diseñadas para garantizar la recopilación, análisis y presentación transparente de datos (Matthew *et al.*, 2021). El objetivo principal de este estudio es sintetizar y mostrar de manera clara los avances tecnológicos relacionados con el tema bajo análisis. Es importante destacar que, en esta investigación, se optó por no considerar el uso del metaanálisis, dado que los estudios abordados en la revisión presentan diferencias significativas en cuanto a su diseño, metodología y resultados, lo que dificulta una combinación efectiva de los datos. La metodología implementada se presenta en la Figura 1.

Figura 1
Ruta metodológica empleada.



3.1 Elección motores de búsqueda y formulación palabras clave

Se procedió a seleccionar dos motores de búsqueda principales: *Web of Science* (WOS) y *Scopus*. Estas plataformas indexan varias bases de datos como *Taylor & Francis*, *ACS Publications*, *Science Direct* y *Springer*. Todas estas fuentes son de acceso libre para los estudiantes, proporcionadas por la Universidad Industrial de Santander. Para llevar a cabo la recopilación de información en las plataformas, realizada el día 31 de julio de 2023, se utilizaron palabras clave como "hydrogen", "green hydrogen", "biomass", "residual biomass" y "technology", cada una de ellas separadas por los conectores "OR" y "AND"; además, la indagación se realizó específicamente por título, *abstract* y palabras clave. En la Tabla 1 se resumen los distintos criterios de inclusión y exclusión de la revisión.

Tabla 1

Criterios de inclusión y exclusión empleados en la revisión sistemática.

CRITERIOS EXCLUSIÓN	CRITERIOS INCLUSIÓN
Todo documento que hable de la electrólisis del agua para la producción de hidrógeno.	Estudios sobre la producción de hidrógeno verde a partir de biomasa residual.
Estudios que no están centrados en la producción de hidrógeno verde a partir de biomasa residual.	Documentos que hablan sobre la gasificación/ pirólisis de biomasa residual.
Conferencias, blogs de congresos, cartas y tesis.	Todo estudio que usa como materia prima la biomasa residual.

3.2 Selección de la información

El inicio de esta investigación se marcó con la formulación de la siguiente pregunta: *¿Qué viabilidad tecnológica tienen los métodos para la obtención de hidrógeno verde a partir de biomasa residual?* Dado que se contaba con una abundante cantidad de información, y siguiendo la tendencia de revisiones sistemáticas previas, mencionadas en el Estado del Arte, se fijó un

período de análisis de 7 años, abarcando desde 2016 hasta 2023. Además, se consideró la selección exclusiva de artículos escritos en inglés y con acceso abierto.

Los resultados obtenidos de Scopus se importaron a la herramienta gratuita Mendeley, ya que simplifica la gestión de referencias, permite la creación de bibliografías en varios formatos y facilita la importación de documentos a Rayyan, el cual es un aplicativo web diseñado para valorar revisiones sistemáticas mediante la selección de estudios, análisis de datos y presentación de resultados; la plataforma está disponible en línea y es gratuita (Elmagarmid *et al.*, 2014). En paralelo, en el caso de WOS se descargaron los archivos en formato BibTeX, que incluían información esencial como título, autores, palabras clave y resumen. Los dos conjuntos de artículos se exportaron a Rayyan, donde se organizaron mediante la asignación de etiquetas y se realizó una depuración inicial basada en la revisión de los títulos y resúmenes.

Tras este proceso, se descargó cada conjunto de datos en formato CSV y se tabuló en una hoja de cálculo en Excel, realizando un cruce de información para identificar y descartar los artículos duplicados entre los documentos obtenidos originalmente de Scopus y WOS. Finalmente, se aplicó un último filtro a la información restante, revisando cada artículo y analizando las conclusiones y los resultados correspondientes. Durante todo el proceso se utilizó la Tabla 1 como referencia.

3.3 Análisis bibliométrico

El análisis bibliométrico se llevó a cabo utilizando los documentos resultantes después de aplicar el método PRISMA. Estos documentos se organizaron en una hoja de cálculo en Excel, donde se incluyó información relevante de cada artículo. Este proceso involucró la lectura completa de cada uno de los documentos para un análisis más detallado en la plataforma gratuita *VosViewer*, la cual consiste en una herramienta de investigación científica que se emplea para

representar y evaluar gráficamente las relaciones de colaboración, coautoría, conceptos clave y referencias bibliográficas en la literatura académica. Esto contribuye a la identificación de tendencias y patrones en la investigación, y tiene como objetivo simplificar la visualización y comprensión de los resultados obtenidos.

3.4 Reconocimiento de los avances y desafíos

Luego de la clasificación de la información, se procedió a identificar y comparar las diversas tecnologías que han sido utilizadas a lo largo del tiempo, así como aquellas que están emergiendo enfocadas en el aumento del rendimiento en la generación de H₂ (volumen de hidrógeno producido/volumen de biomasa alimentada). Se consideraron varios criterios de categorización, como el tipo de biomasa, el proceso empleado, el lecho utilizado en el reactor y la presencia de un proceso catalítico. Estos criterios se relacionaron con el porcentaje total de hidrógeno producido. Además, se evaluó la implementación de tecnologías no convencionales como la fotofermentación, fermentación oscura y electrólisis. Por último, se examinaron los desafíos que afrontan las tecnologías comúnmente empleadas, lo que proporcionó una base sólida para la planificación de futuras propuestas de investigación en este campo. Como complemento se realizó un análisis TRL (Technology Readiness Levels), el cual consiste en una escala para medir el grado de madurez de una tecnología a partir de 9 niveles, desde el Nivel 1, que representa la idea básica o principios teóricos de la tecnología, hasta el 9, que indica el haber alcanzado un estado de madurez completo y es apta para su uso comercial (Ayming, 2021). (Ver apéndice B)

4 Resultados y discusión

4.1 Ecuaciones de búsqueda: resultados protocolo PRISMA

Los resultados obtenidos tras la exploración en los motores de búsqueda se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2

Ecuación y resultados obtenidos por cada motor de búsqueda.

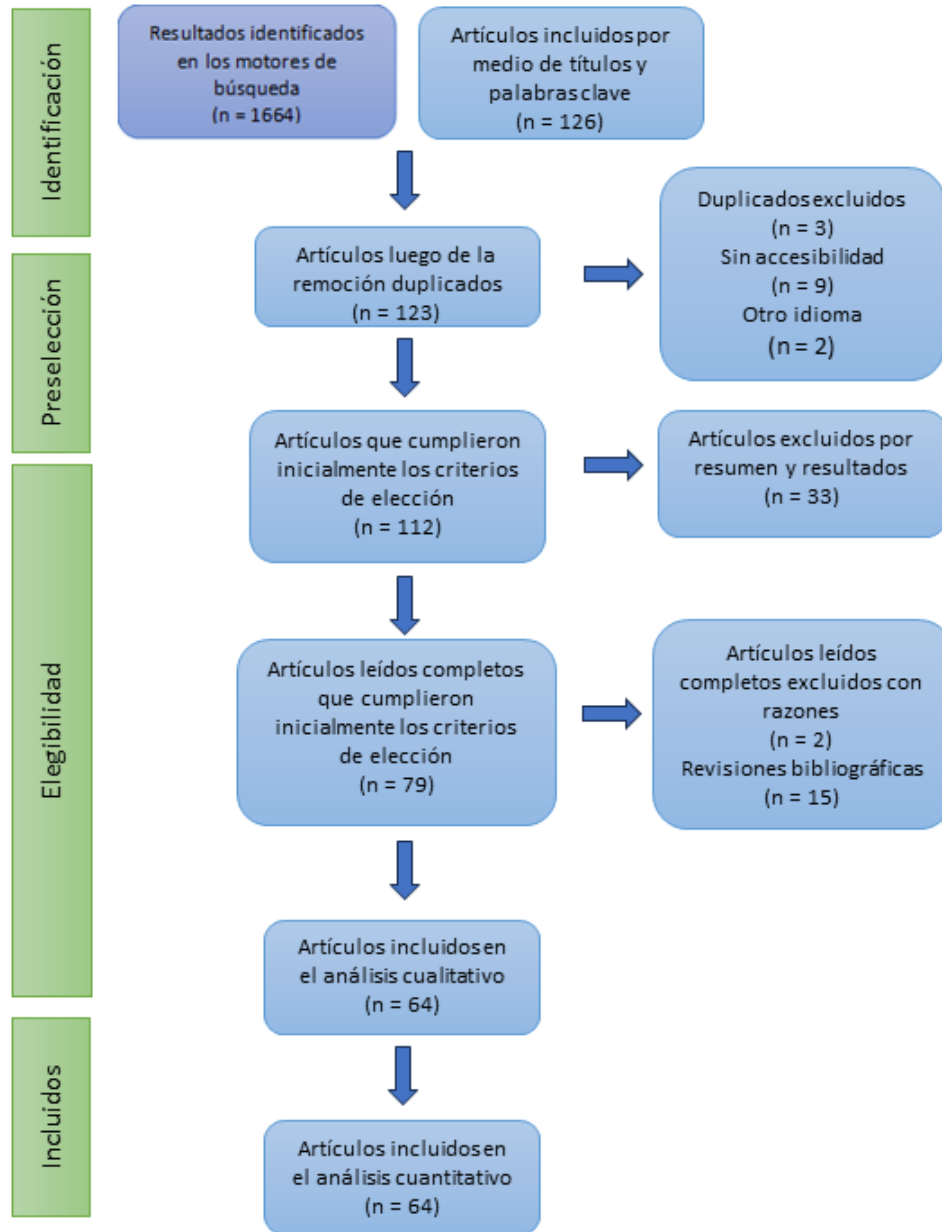
Base de datos	Ecuación de búsqueda	Resultados
SCOPUS	TITLE-ABS-KEY ((hydrogen OR “green hydrogen”) AND (biomass OR “residual biomass”) AND (technology))	832
WOS	Hydrogen OR “green hydrogen” AND “residual Biomass” OR Biomass AND technology (Topic)	832
Total		1664

Se hallaron 1664 artículos en total, de los cuales, al depurarlos mediante la herramienta Rayyan, se seleccionaron 126 referencias. Tras ser tabulados y realizando el cruce entre las dos bases de datos, se encontraron 3 documentos duplicados. Al acceder a los artículos con el propósito de llevar a cabo la lectura de los resultados y conclusiones, se halló que 34 de ellos no estaban centrados en la producción directa de biohidrógeno; de estos, 9 no estaban disponibles en acceso abierto y 2 estaban redactados en otro idioma.

Al realizar la lectura completa de los documentos seleccionados, se identificó que 15 de los 79 eran revisiones sistemáticas. Luego de llegar a un consenso con los directores del trabajo, se decidió excluir estas revisiones del proceso, lo que dejó un total de 64 artículos que se ajustaban a los criterios de inclusión y, por lo tanto, se tuvieron en cuenta para la revisión bibliográfica. En la Figura 2, se observa de manera detallada los resultados de la aplicación del protocolo PRISMA.

Figura 2

Diagrama de flujo método PRISMA.



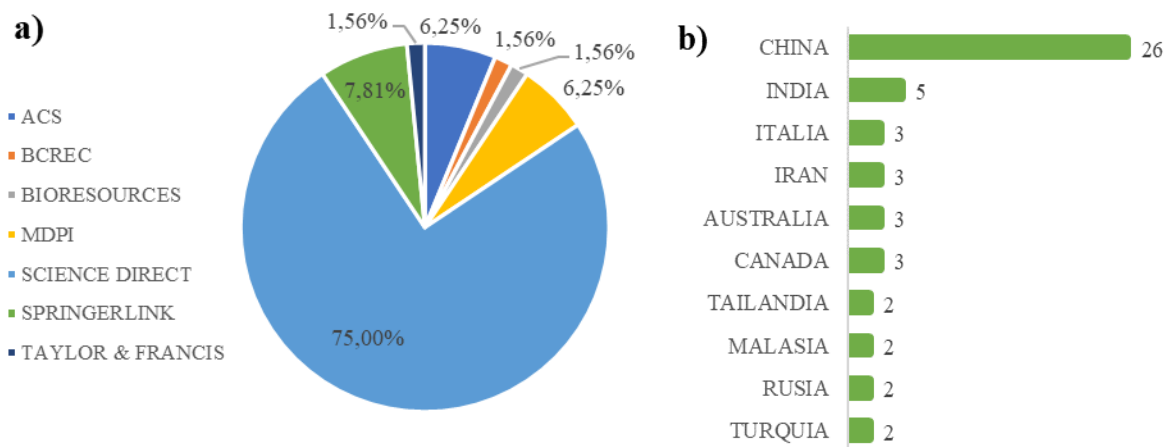
4.2 Análisis bibliométrico

La información extraída de los 64 artículos, después de haberlos leído en su totalidad, se registró en Microsoft Excel. En esta herramienta se organizó la información de acuerdo con los

autores, año de publicación, revista de origen y número de citas de cada artículo. Además, se incorporaron datos esenciales para el análisis de las tecnologías empleadas, como el tipo de biomasa, el proceso utilizado, el lecho del reactor y la cantidad de hidrógeno producido en cada estudio. Este enfoque en el análisis detallado de los artículos permitió identificar tendencias y patrones en la investigación sobre la producción de hidrógeno verde. La Figura 3a revela que, entre las principales bases de datos para la publicación de avances tecnológicos en este campo, *Science Direct* lidera con un 75 %, seguida por *Springer Link*, que contribuye con un 7.81 % del total de publicaciones incluidas en esta revisión bibliográfica.

Figura 3

Número de artículos totales por a) cada base de datos. b) Países con más publicaciones incluidas en la revisión.



Por otra parte, China resalta como el país líder en investigación sobre la producción de hidrógeno, tal como se muestra en la Figura 3b. Este país ha enfocado sus esfuerzos en la transición energética y se destaca por su significativa producción de biomasa. Se estima que la energía derivada de biomasa representa un total de 5000 millones de toneladas de diversas especies, entre las que destacan la paja de cultivos, residuos de procesos agrícolas, desechos orgánicos industriales, residuos forestales y las aguas residuales (Wang *et al.*, 2021).

En el análisis bibliométrico se pudo indagar que las revistas más destacadas en la publicación de artículos fueron *Chemical Engineering Journal*, *International Journal of Hydrogen Energy* y *Energy*. Además, *Energy Conversion and Management* y las dos primeras fuentes mencionadas tienen el mayor número de citaciones (ver Tabla 3).

Tabla 3

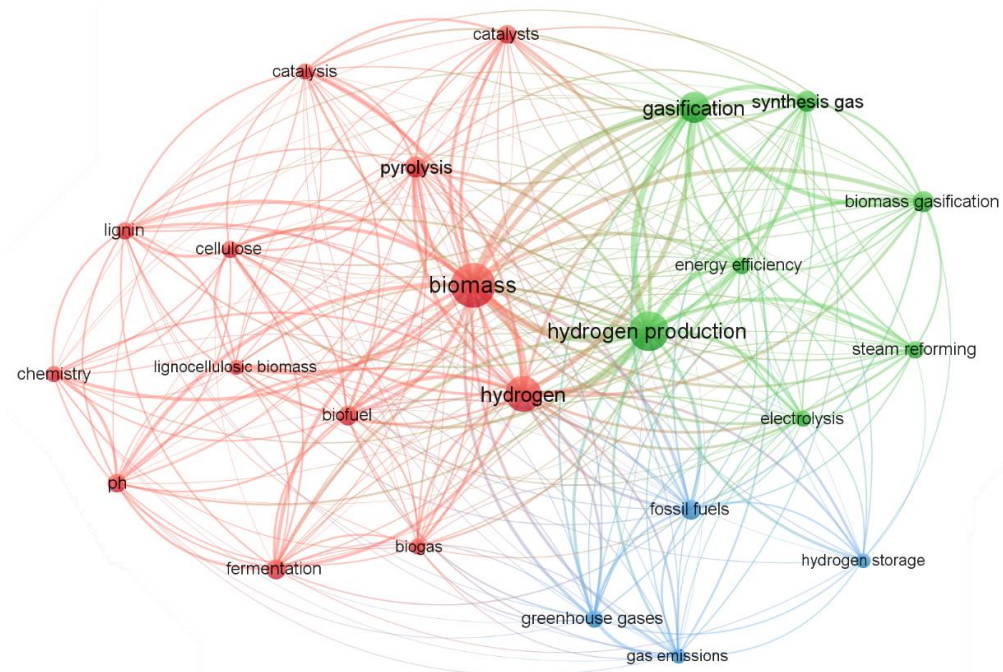
Revistas más citadas sobre la producción de H₂ a partir de biomasa residual.

Revista	Citaciones	Artículos publicados
Chemical Engineering Journal	494	6
International Journal of Hydrogen Energy	321	14
Energy Conversion and Management	272	3
Journal of Analytical and Applied Pyrolysis	55	3
Catalysis Today	55	1
Energy and Fuels	53	2
Bioresource Technology	47	3
Carbon Resources Conversion	45	1
Computers \& Chemical Engineering	41	1
Energy	35	4

Finalmente, en la Figura 4 se puede evidenciar que las palabras más usadas fueron: *hydrogen*, *hydrogen production*, *biomass*, *gasification* y *pirolisis*. Además, entre los nodos verdes y rojos se encuentran los cuatro métodos principales de producción de hidrógeno verde (gasificación, pirólisis, fermentación y electrólisis), junto con la aplicación de diversas herramientas destinadas a mejorar el rendimiento de su producción como el uso de catalizadores. Por otra parte, los clústeres azules se centran en los efectos asociados al uso de combustibles fósiles y al almacenamiento de hidrógeno, lo que nos proporciona una visión clara de las áreas de enfoque y las interconexiones en la investigación relacionada con el hidrógeno verde.

Figura 4

Mapa sobre la relación entre palabras clave de los artículos seleccionados realizado en Vosviewer.



4.3 Procesos de producción de H₂ a partir de biomasa residual

Actualmente, la mayoría de las tecnologías empleadas para la generación de hidrógeno se fundamentan en el uso de recursos fósiles, como el carbón y el gas natural, y aproximadamente el 50 % de la producción de H₂ proviene del reformado con vapor de gas natural. A pesar de esto, la electrólisis del agua emerge como una tecnología prometedora, pero presenta desafíos de rendimiento energética (Cheng *et al.*, 2022). Sin embargo, se han llevado a cabo investigaciones significativas con el objetivo de desarrollar métodos de producción de H₂ más sostenibles. Estos trabajos se centran en enfoques termoquímicos, biológicos y de electrólisis, usando como materia prima biomasa residual (Cao *et al.*, 2020).

Dentro de los enfoques termoquímicos, la gasificación y la pirólisis de biomasa han ganado especial atención entre los investigadores, debido a su capacidad para sintetizar biohidrógeno a

gran escala. Esto se debe a que los enfoques biológicos, aunque viables, tienden a ser más lentos y menos eficientes en términos de producción (Kumar *et al.*, 2023).

4.3.1 Tipo de biomasa residual

La biomasa es una variedad de organismos biológicos derivada de materiales naturales y no fósiles, son recursos renovables basados en carbono y ampliamente disponibles en todo el mundo (Cao *et al.*, 2020). Dentro de las fuentes se puede encontrar la biomasa lignocelulósica, algas, desechos de alimentos, residuos sólidos urbanos y aguas residuales con alto contenido de materia orgánica (lodo activado). Una de las principales biomásas utilizadas es la lignocelulósica, que comprende principalmente los residuos agrícolas (restos de cultivos cosechados, estiércol de vaca y la cáscara de palmiste), la madera (aserrín y cortezas) y los desechos agroindustriales (residuos de frutas y lignina Kraft). Esta biomasa se caracteriza por estar compuesta en gran medida por lignina, hemicelulosa y celulosa. Así mismo, es importante señalar que, en la mayoría de los casos, la biomasa requiere un pretratamiento, lo que implica la preparación del material para la conversión; este proceso puede realizarse químicamente (pretratamiento con vapor y ácido) o físicamente (picado, triturado, secado) (Bolívar *et al.*, 2022). Además, la composición de la biomasa residual es un factor importante para la producción eficiente de hidrógeno según la tecnología empleada (se discutirá más adelante). La naturaleza de diferentes tipos de biomasa se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4

Análisis final y próximo del porcentaje en peso de diversas biomásas.

Biomasa	C	H	N	S	O	Ceniza	Humedad	Fuente
Estiércol	50.2	6.06	42.7	0.07	42.7	1.84	19.8	(Cao <i>et al.</i> , 2020)
Bagazo de caña	45.90	6.11	0.51	0.09	47.39	2.31	-	(Zheng, <i>et al.</i> , 2023)

Biomasa	C	H	N	S	O	Ceniza	Humedad	Fuente
Residuos de palmera destilera	39.24	6.05	1.21	0.19	53.31	13.37	9.2	(Jamro <i>et al.</i> , 2023)
Agroresiduos	35.60	4.40	1.80	-	32.20	-	-	(Timofeeva <i>et al.</i> , 2023)
Lodo	50.2	7.09	5.63	1.77	34.9	25.7	32.5	(Cao <i>et al.</i> , 2020)
Mazorca de maíz	44.9	6.09	0.26	0	48.75	1.75	-	(Yue W <i>et al.</i> , 2023)
Residuos municipales urbanos	34.48	4.70	1.04	-	59.78	37.22	5.39	(Tomasek <i>et al.</i> , 2022)
Paja	48.09	5.97	0.82	0.15	43.9	6.37	12.7	(Cao <i>et al.</i> , 2020)
Madera	50.8	6.06	42.7	0.07	42.7	1.84	19.8	(Cao <i>et al.</i> , 2020)

4.3.2 Técnicas termoquímicas

4.3.2.1 Gasificación de biomasa residual.

Es un proceso de combustión donde la biomasa orgánica se somete a altas temperaturas (600-1000 °C) con diferentes agentes gasificantes como vapor, agua, aire o pequeñas cantidades de oxígeno. El gas resultante del proceso contiene, principalmente, hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano y nitrógeno, además de partículas de alquitrán, amoníaco y compuestos de azufre en menores cantidades, dependiendo de las condiciones de la operación (Salimi, 2016). En comparación a la pirólisis, ha demostrado obtener mayor generación de gas de síntesis, pues el rendimiento de residuos sólidos (alquitrán) es mínimo debido a las altas temperaturas. (Bolívar *et al.*, 2022)

Los gasificadores se pueden dividir según el lecho utilizado en el reactor (lecho fijo, lecho fluidizado, lecho móvil y lecho fluidizado burbujeante). Los de lecho fijo se usan, comúnmente, en plantas de pequeño tamaño y se caracterizan por una construcción y operación simple; pero

tienen muy poca flexibilidad para materias primas heterogéneas. Los reactores de lecho fluidizado permiten una transferencia alta y uniforme de calor, además de una menor conversión de alquitrán, desecho que puede causar graves efectos técnicos durante la producción del gas síntesis (Barisano *et al.*, 2021). Por otro lado, los reactores de lecho móvil tienen una mayor superficie de contacto entre la biomasa y el agente gasificante, lo que mejora el rendimiento y reduce la formación de alquitrán; sin embargo, estos equipos también experimentan un mayor desgaste y un consumo de energía más alto (Nguyen, *et al.*, 2023). En comparación, los lechos burbujeantes presentan menos desgaste y menor consumo de energía, aunque a costa de un rendimiento menor y un aumento en la producción de alquitrán. (Kartal & Özveren, 2021)

Tabla 5
Reacciones básicas de la gasificación de biomasa.

Combustión de carbón	
$C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$	Oxidación parcial
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	Oxidación
Gasificación de carbón	
$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	Oxidación parcial
$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	Cambio de agua – gas primario
$C + 2H_2O \leftrightarrow CO_2 + 2H_2$	Cambio de agua – gas secundario
$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$	Metanación
Oxidación de material volátil	
$C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$	Oxidación parcial
$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$	Oxidación
$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	Oxidación
$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	Cambio de agua – gas

Nota. Tomado de Ersöz *et al.* (2018)

En la Tabla 5 se pueden identificar las distintas reacciones que ocurren durante la gasificación. La reacción de cambio de agua – gas (WGS) es reversible y moderadamente exotérmica; es una reacción química donde el vapor de agua reacciona con el carbono para formar monóxido de carbono e hidrogeno. Esta reacción se favorece termodinámicamente a bajas

temperaturas (la reacción ocurre de manera espontánea y ocurre sin necesidad de energía externa) y cinéticamente a altas temperaturas (la velocidad de reacción aumenta). Dado que no hay cambio de volumen de reactivos a los productos, la presión no tiene ningún efecto sobre la reacción (Ersöz *et al.*, 2018). Para aumentar la producción de hidrógeno, se debe mejorar la reacción de cambio agua-gas e inhibir la reacción de metanación; por tanto, el agua a alta temperatura puede mejorar la producción de hidrógeno (Salimi, *et al.*, 2016).

Por otro lado, una de las nuevas tecnologías que se han estudiado en el transcurrir de los años ha sido la gasificación en agua supercrítica (SWCG), donde se usa agua como agente gasificante a condiciones que superan las críticas (374.3 °C y 22.1 MPa). En este proceso, el agua actúa como reactivo y disolvente, lo que implica una fuente eficiente y ecológica de conversión de biomasa húmeda. Además, esta tecnología presenta ventajas significativas en la gasificación de polímeros complejos como la lignina. (Chen, *et al.*, 2023). Como se aprecia en la Tabla 6, las rutas que tuvieron mayor porcentaje de producción de hidrógeno fueron las que usaban como gasificante vapor y agua supercrítica; en todos los estudios se pudo concluir que el aumento de la temperatura favorecía el proceso y disminuía de manera considerable la formación de alquitrán. Chen, *et al.*, 2023, mediante una simulación de dinámica molecular, pudieron determinar que, en el proceso de SWCG, el 83 % de los átomos de H₂ provenían de las moléculas de agua y el 16.7 % los aportaban las moléculas de lignina; cabe resaltar que se presenta una menor producción de hidrógeno cuando la biomasa tiene más contenido de lignina, debido a que es un polímero resistente a la degradación térmica y química.

Por otra parte, la ruta que obtuvo un 62.70 % de H₂ usó gasificación con vapor de la materia orgánica digerida, obtenida después de la digestión anaeróbica y la fermentación oscura de biomasa lignocelulósica. Se advierte que los residuos con mayor contenido de carbono, menos

cenizas y componentes minerales, resultaron ser la composición más idónea para la producción de hidrógeno. Además, el uso de vapor como agente gasificante permite que la mayor parte de la materia orgánica de los digestatos se convierta en gas de síntesis, contribuyendo al incremento de la producción de H₂. (Timofeeva *et al.*, 2023)

Tabla 6

Comparación de diferentes formas de gasificación y su rendimiento de producción de H₂.

Tipo	Biomasa	T (°C)	H₂ %(vol)	Referencia
Gasificación con aire	Agrícola	900	49.09	(Jamro, <i>et al.</i> , 2023)
Gasificación con aire	Madera	No especificado	45.67	(Singh, <i>et al.</i> , 2023)
SWCG	Lignina Kraft	550-850	55.30	(Chen, <i>et al.</i> , 2023)
Gasificación con vapor	Agrícola	1000	62.70	(Timofeeva <i>et al.</i> , 2023)
Gasificación vapor/oxígeno	Agrícola	850	33	(Wang, <i>et al.</i> , 2021)
SWCG	Agrícola	700	25.30	(Qian <i>et al.</i> , 2021)
SWCG	Lodo activo	450	38.30	(Casademont <i>et al.</i> , 2018)
SWCG	Agrícola	700	52.47	(Ersöz <i>et al.</i> , 2018)
SWCG	Agrícola	440	33.51	(Salimi, <i>et al.</i> , 2016)

4.3.2.2 Gasificación catalítica

Tanto en la gasificación utilizando vapor como en la gasificación con agua supercrítica, el uso de catalizadores puede disminuir la producción de alquitrán y mejorar la tasa de gasificación del carbono y la selectividad del hidrógeno de la biomasa (Chen, *et al.*, 2023). Una amplia variedad de estudios ha demostrado que los catalizadores homogéneos de metales alcalinos como KOH, NaOH, CaCO₃, K₂CO₃, y catalizadores metálicos heterogéneos como Ru, Rh, Ni, Cr, Co, Zn, Pd,

Ti y Mo, pueden ayudar a aumentar la eficacia durante la gasificación. Generalmente, los catalizadores de metales alcalinos mejoran la reacción WGS, lo que resulta en un mayor rendimiento de H₂. (Demirel, *et al.*, 2021) En la tabla 7 se expone el rendimiento alcanzada al utilizar diferentes catalizadores.

Tabla 7

Diferentes tipos de catalizador y rendimiento en la producción de H₂.

Tipo de gasificación	Biomasa	Catalizador	Tipo de lecho	H ₂ %(vol)	Notas	Referencia
Vapor	Agrícola	Fe ₇ Ni ₃ /CaO	Fijo	69.20	Investigación sobre las estabilidades catalíticas de diversos materiales bifuncionales	(Zheng <i>et al.</i> , 2023)
Vapor	Agrícola	Cenizas al fondo de carbón	Fluidizado	81.76	Simulación para emplear en una planta a escala piloto.	(Hussain <i>et al.</i> , 2023)
Vapor	Madera	0.8CeO ₃ ,2FeO ₃ /Dolomita	Fijo	48.60	Se centró en la reducción de alquitrán	(Zhang <i>et al.</i> , 2022)
SWCG	Agroindustria	KoH	Discontinuo no especificado	63.50	Estudio efectos de los parámetros de reacción de la gasificación de pulpa de fruta	(Demirel <i>et al.</i> , 2021)
Aire	Agrícola	Cenizas al fondo de carbón	Fijo	30.19	Uso de redes neuronales en procesos de conversión química	(Shahbaz <i>et al.</i> , 2020)
SWCG	Agrícola	KoH	Discontinuo no especificado	66.60	Estudio de los diferentes parámetros que puede	(Okolie <i>et al.</i> , 2020)

Tipo de gasificación	Biomasa	Catalizador	Tipo de lecho	H ₂ %(vol)	Notas	Referencia
Aire/Vapor	Madera	Cemento calcinado	Fluidizado	50.30	afectar la síntesis de H ₂ Estudio experimental sobre el rendimiento usando cemento calcinado.	(Sui <i>et al.</i> , 2020)
vapor	Agrícola	Fe ₂ O ₃ /CaO	Fijo	63.20	Efectos del vapor y la relación del catalizador en la producción de gas síntesis	(Hu <i>et al.</i> , 2020)
SWCG	Agrícola	Ni/MgO	Discontinuo no especificado	39.30	Evaluación de la adición de Ni en la producción de H ₂ .	(Lu <i>et al.</i> , 2019)
No especificado	Madera	Ni-Mg-Al	Fijo	52.30	Adición de Ca al sistema catalizador de Ni, evaluación de rendimientos	(Jin <i>et al.</i> , 2018)
Vapor	Madera	NiO/MD	Fluidizado	47.22	Se centró en la reducción de alquitrán	(Hu <i>et al.</i> , 2016)
SWCG	Agrícola/ Agroindustria	K ₂ CO ₃ y NaOH	Fijo	48	Evaluación del rendimiento de producción de H ₂	(Nanda <i>et al.</i> , 2016)

De acuerdo con los estudios presentados, se destaca que las rutas que emplean la gasificación con vapor logran las concentraciones más altas de hidrógeno. A pesar de que el uso de catalizadores mejora significativamente la concentración de H₂, en investigaciones como las de Shahbaz *et al.*, (2020) y Lu *et al.*, (2019) se observó un rendimiento de solo el 30.12 y 39.30 %

respectivamente. Esto se atribuye al hecho de que la gasificación no se llevó a cabo a altas temperaturas (> 800 °C), lo que resultó en una actividad catalítica limitada en el proceso.

Por otra parte, se evidencian nuevas tecnologías como la gasificación con vapor mejorada por sorción, permitiendo la captura de CO₂ y evitando su emisión directa a la atmósfera. Esto, a su vez, potencia el rendimiento en la generación de electricidad o calor, reduciendo la cantidad de energía necesaria para el proceso. Este enfoque se logra de manera simultánea con la producción de hidrógeno mediante el uso de sorbentes sólidos a base de CaO dopado con Ni. Estos sorbentes no presentan actividad catalítica, pues el Fe₂O₅ se emplea como catalizador con una estructura perovskita para optimizar la reacción de conversión de agua a gas (Zheng, *et al.*, 2023). Otra manera innovadora donde se alcanza una alta producción de hidrógeno es el uso de cenizas de fondo de carbón (desechos de la industria de las centrales eléctricas) en un reactor de lecho fluidizado, donde sus compuestos metálicos (Fe₂O₃, Fe₃O₄, CaO, CaSO₄, etc) disminuyen significativamente el rendimiento de alquitrán. (Hussain, *et al.*, 2023)

La gasificación en bucle químico se presenta como una tecnología prometedora para la producción de gas de síntesis. En este proceso, se utiliza un material reactivo sólido como agente gasificante, lo que conlleva beneficios significativos para la descomposición acelerada del alquitrán. Además, el oxígeno reticular de los óxidos metálicos, llamados portadores de oxígeno (OC), se utilizan para la oxidación del combustible en ausencia de O₂. En comparación con los métodos de gasificación convencionales, el portador de oxígeno desempeña un papel fundamental porque se emplea para generar O₂ durante la fase de conversión del proceso, contribuyendo así a el rendimiento global de la operación. (Zeng, *et al.*, 2021) (Yan, *et al.*, 2020)

También se ha estudiado el uso de diferentes minerales baratos y de fácil acceso, como la dolomita (empleado como base en lechos fluidizados), KOH y cemento calcinado. La dolomita,

en combinación con catalizadores de perovskita, compuestos por metales alcalinos y metales de tierras raras con un metal de transición, ha demostrado potenciar significativamente la actividad catalítica, promoviendo una fragmentación eficaz del alquitrán y reduciendo al mínimo la concentración de sus hidrocarburos aromáticos policíclicos pesados. Con el uso de cemento calcinado y altas temperaturas se pudo lograr una reducción de alquitrán que sale del reactor de 6.92 g/Nm³ a 0.49 g/Nm³ y una composición de H₂ del 2.7 g/Nm³. (Zhang & Niu, 2021); (Sui, *et al.*, 202)

4.3.2.3 Pirólisis de biomasa residual

El proceso de pirólisis consiste en la descomposición de la biomasa termoquímicamente en condiciones anaeróbicas, obteniendo tres productos principales: biocarbón, bioaceite y gas; esta operación puede ocurrir entre 300 °C y 1300 °C (Timofeeva *et al.*, 2023). Además, la tecnología requiere menos costos de capital, es fácilmente escalable y demanda bajo consumo de energía, pero una de sus desventajas es el uso de alta presión y bajo rendimiento de la producción de hidrógeno.(Karaeva, *et al.*, 2022)

Tabla 8

Comparación de diferentes tipos de pirólisis y sus rendimientos.

Tipo pirólisis	Condiciones de operación	Rendimientos
Lento	Temperatura: 300-700 °C Tiempo de residencia del vapor: 10-100 min Velocidad de calentamiento: 0.1-1 °C/s	Bioaceite ≈ 30 wt% Biocarbón ≈ 35 wt% Gas ≈ 35 wt%
Rápido	Temperatura: 400-800 °C Tiempo de residencia del vapor: 0.5-5 s Velocidad de calentamiento: 10-200 °C/s	Bioaceite ≈ 50 wt% Biocarbón ≈ 20 wt% Gas ≈ 30 wt%
Flash	Temperatura: 800-1000 °C Tiempo de residencia del vapor: <0.5 s Velocidad de calentamiento: >1000 °C/s	Bioaceite ≈ 75 wt% Biocarbón ≈ 12 wt% Gas ≈ 13 wt%

Nota. Tomado de Caballero, *et al.* (2022)

El proceso de pirólisis puede efectuarse de tres maneras: lenta, rápida y súbita. La pirólisis lenta favorece la producción de carbón, mientras que la pirólisis rápida y súbita beneficia el

rendimiento de bioaceite (Caballero, *et al.*, 2022). La Tabla 8 presenta la comparación de los rendimientos para diferentes procesos de pirólisis, donde se puede concluir que la mayor producción de gas con contenido de hidrógeno se logra en el caso de la pirólisis lenta. Sin embargo, es relevante notar que esta tecnología también ofrece mayores rendimientos de biocarbón (35 %) y bioaceite (30 %) como productos de valor añadido. Por lo tanto, las investigaciones sugieren que la combinación de pirólisis y gasificación podría resultar en un mayor rendimiento para la producción de hidrógeno verde.

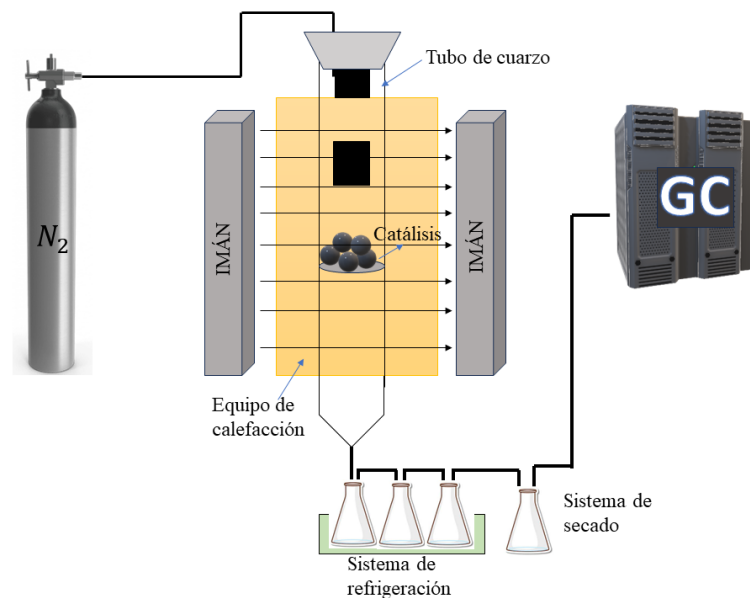
Por otra parte, se ha investigado que la adición de un catalizador en el proceso mejora la selectividad de los productos gaseosos, el reformado del alquitrán y la adsorción de CO₂ (Yue, *et al.*, 2023). Uno de los catalizadores ampliamente empleados es la combinación de Ni/CaO; el Ni es eficaz para la conversión térmica del alquitrán, mientras que el CaO posee gran rendimiento catalítico para la absorción de CO₂ y, potencialmente, puede catalizar la pirólisis de sustancias volátiles para producir más H₂. (Zhao, *et al.*, 2021)

Otras formas empleadas consisten en la combinación de diferentes residuos; a este proceso se le llama copirólisis. En el estudio de Jun *et al.*, (2017) la copirólisis se realizó con paja de trigo y residuos sólidos municipales que contenían tres tipos de plásticos: polipropileno (PP), polietileno (PE) y tereftalato de polietileno (PET), en un reactor de lecho fluidizado a 900 °C, logrando una concentración de H₂ del 53.80 %. Los residuos plásticos terminan siendo un gran candidato para su conversión en hidrógeno por su alto contenido de carbono, bajo contenido de cenizas y su facilidad de obtención. Lograron una concentración de H₂ del 53.80 % en el efluente con una adición del 20 % de paja en los residuos plásticos. Así mismo, en el estudio Karaeva *et al.*(2022) se produjo gas síntesis mediante copirólisis utilizando una mezcla de biomasa compuesta por estiércol de vaca y tallos de maleza *Amaranthus retroflexus L*, logrando una concentración de

hidrógeno del 21.17 % al finalizar el proceso. Sin embargo, la producción eficiente de hidrógeno se vio afectada por varios factores: falta de un catalizador, composición de los residuos (lignina, celulosa y hemicelulosa) y temperatura final del proceso. Dado que la pirólisis es una reacción endotérmica que requiere energía para ocurrir, la adición de un catalizador podría reducir esta demanda energética. Cuando la biomasa contiene un alto porcentaje de lignina, una molécula difícil de descomponer en hidrógeno, el rendimiento disminuye; mientras que temperaturas altas favorecen la síntesis de gas y temperaturas bajas pueden llevar a la formación de productos no deseados, como el alquitrán. Es importante destacar que el alto contenido de carbono obtenido (47.52 %) en el biocarbón resulta atractivo como aditivo en el suelo; además, se propone un esquema de procesamiento bioquímico implicando la combinación de fermentación oscura y pirólisis.

Figura 5

Sistema de pirólisis de lecho Fijo asistido por campo magnético.



Nota. Adaptado de (Zhao *et al.*, 2021).

En la Figura 5 se puede observar la configuración del uso de un campo magnético, el cual ha demostrado ser beneficioso para el craqueo del alquitrán y la promoción de la reacción WGS en el proceso de pirólisis catalítica. Este enfoque ha resultado en un rendimiento notable, alcanzando un 62.20 % de H₂ en el gas síntesis (Zhao, *et al.*, 2021).

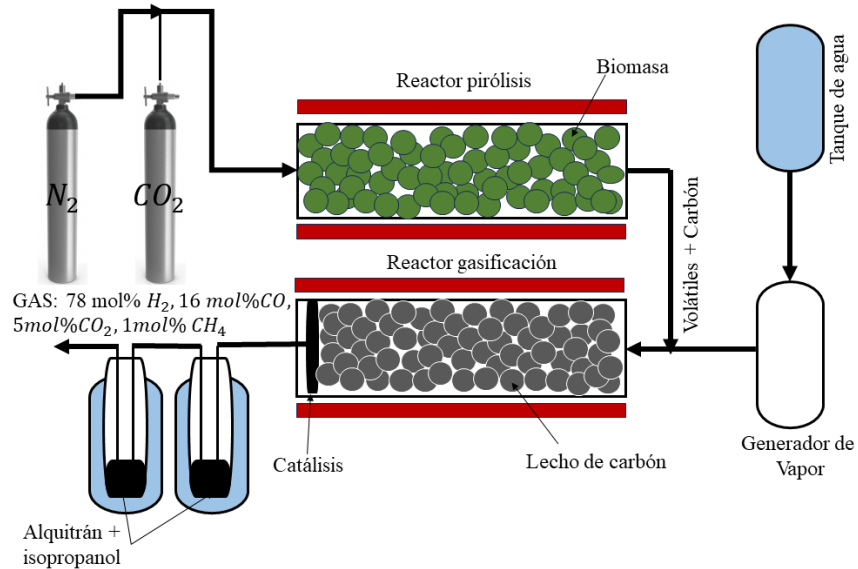
Por otro lado, Lestinsky *et al.*, (2017) presentaron una alternativa al uso de hornos convencionales en la etapa de gasificación al aplicar microondas, demostrando su capacidad para acelerar reacciones catalíticas y lograr un calentamiento rápido y uniforme de los residuos. En su estudio, el tiempo de reacción para la pirólisis catalítica asistida por microondas se redujo a 10 minutos, en contraste con los 30 minutos requeridos en la pirólisis convencional. Además de estos beneficios, también promueve una mayor producción de gas en comparación con los métodos convencionales, debido a su suministro selectivo de calor al aumentar solo la temperatura de las moléculas que contienen funciones polares (moléculas más susceptibles a la absorción por microondas, permitiendo un calentamiento más rápido), como la celulosa y la hemicelulosa.

4.3.2.4 Procesos combinados

Los mayores rendimientos en la producción de hidrógeno verde se han logrado mediante la implementación de gasificación en dos etapas (Figura 6). En este proceso, se consigue una conversión de biomasa en gas de síntesis un 25 % mayor gracias al aprovechamiento de la energía generada por la pirólisis, ya que esta etapa es endotérmica y se utiliza para alimentar la gasificación, que es exotérmica; además de la reducción de hasta un 60 % de emisiones contaminantes por la gasificación de los productos secundarios de la pirólisis. (Khan *et al.*, 2022) El proceso inicialmente se lleva a cabo la pirólisis de la biomasa, donde el biocarbón resultante se lleva a la fase de gasificación. Esta combinación de tecnologías tiene como objetivo principal lograr un mayor aprovechamiento de los residuos, reducir la formación de productos no deseados

del 10 al 5 %, mejorar el rendimiento energética del 70 al 80 % y, por supuesto, obtener un mayor rendimiento de hidrógeno aproximadamente del 50 al 60 % en comparación con la gasificación convencional de biomasa. (Prasertcharoensuk, *et al.*, 2021).

Figura 6
Sistema gasificación en dos etapas.



Nota. Adaptado de (Prasertcharoensuk, *et al.*, 2021).

En el contexto de procesos combinados no catalíticos que emplean vapor de agua, se ha logrado obtener gas rico en hidrógeno. Por ejemplo, al utilizar estiércol de vaca y una temperatura de 900 °C, la reacción de agua – gas de la gasificación de los productos de pirólisis condujo a una conversión en H₂ de un 88.15 % en el gas resultante (Zhu, *et al.*, 2022). Con el uso de un reactor acoplado de pirólisis-gasificación de lecho móvil, donde la gasificación se realizó en bucle químico, a una temperatura de 820 °C, se logró una conversión del carbón de un 99.08 % y una producción de hidrógeno del 61 % (Zeng, *et al.*, 2021).

Por otra parte, Porcu *et al.*(2021), mediante el uso de astillas de ciprés de madera sardas, llevaron a cabo la pirólisis en modo discontinuo a 800 °C; posteriormente, el biocarbón ingresa a

una etapa de gasificación continua en un reactor de lecho fluidizado burbujeante con vapor a 850 °C. Este proceso alcanzó una conversión de hidrógeno del 21.31 % en volumen debido al bajo contenido de carbono (51.8 %) en la biomasa residual utilizada.

➤ **Catalizadores a base de Ni en procesos combinados**

Los catalizadores que contienen níquel como componente principal son económicos y destacan por su eficacia en la generación de hidrógeno, así como por su alta capacidad de reacción en la descomposición del alquitrán. No obstante, la efectividad del catalizador a base de níquel puede disminuir debido a la acumulación de coque en su superficie y a la falta de uniformidad en el calentamiento del lecho catalítico durante el proceso de gasificación del biocarbón (Wu *et al.*, 2022). En ese orden de ideas, se han desarrollado catalizadores duales donde el Ni se puede unir a diversos soportes como Al₂O₃, Co, CaO-C, espuma cerámica, carbón activado (CaO), entre otros. Los catalizadores a base de CaO-C tienen una alta actividad catalítica, gran capacidad de adsorción de CO₂ y una baja formación de coque. (Chai, *et al.*, 2020) (Duan *et al.*, 2020)

Otros de los materiales que podrían incluir en la catálisis con Ni incluyen la dolomita y el lodo rojo (RL). El lodo rojo, un producto de desecho del procesamiento de la bauxita, compuesto principalmente de Fe₂O₃, Al₂O₃, SiO₂, TiO₂ y una variedad de óxidos de metales alcalinos y alcalinotérreos, es un catalizador muy económico. El uso de RL puede llegar a reducir hasta en un 58 % el naftaleno, principal componente del alquitrán (Prasertcharoensuk, *et al.*, 2021). La dolomita, según Esfahani *et al.* (2017), provoca una conversión de alquitrán del 86.2-93.5 %.

Por otra parte, los catalizadores bimetálicos de Ni-Fe, como el NiO-Fe₂O₃-Al₂O₃, muestran resultados notables en el proceso de pirólisis-gasificación con vapor cuando se lleva a cabo con el catalizador 9NiFeAl. Durante este proceso, el contenido producido en el gas síntesis de H₂, CO,

CO₂ y CH₄ fue de 37.2, 27.4, 21.4 y 6.2 %, respectivamente. Estos resultados reflejan un significativo aumento en el rendimiento del gas en comparación al uso de un lecho de arena sin catalizador, pasando del 33 al 62.8 % en peso. (Dong, y otros, 2017)

➤ **Catalizadores Bimetálicos en procesos combinados**

Los óxidos metálicos mixtos como el WO₃ –ZrO₂ y WO₃ –TiO₂ han demostrado ser catalizadores eficaces para promover las reacciones de isomerización y deshidratación de azúcares reductores, convirtiendo así los azúcares lignocelulósicos en ácido levulínico y furfural. Estos catalizadores destacan por su gran estabilidad, bajo precio y capacidad de regeneración por oxidación, en comparación con metales de transición (Ni, Co, Ru, Pd) y catalizadores homogéneos (Nanda *et al.*, 2022) (Waluyo *et al.*, 2021). En el estudio de Nanda, *et al.* (2022) combinan el proceso de pirólisis y gasificación en agua supercrítica usando harina de canola y polietileno de baja densidad (LDPE) a 525 °C, durante un tiempo de residencia de 60 min con una relación plástico-biomasa 50:50, en un rango de presión de 22 a 25 MPa. Se realizaron pruebas con cinco catalizadores diferentes, que incluyeron hidróxidos homogéneos (5 % en peso de KOH), óxidos metálicos (ZrO₂ y TiO₂) y óxidos mixtos (WO₃ –TiO₂ y WO₃ –ZrO₂). Se pudo observar que los catalizadores WO₃ –TiO₂ y KOH presentaron un mayor desempeño en la producción de H₂, 18.5 y 17 mmol/g, respectivamente; mientras que ZrO₂ y WO₃ –ZrO₂ obtuvieron 7.8 y 7.4 mmol H₂/g biomasa. Los bajos rendimientos con los catalizadores ZrO₂ y WO₃ –ZrO₂ se deben a que promovían reacciones intermedias, además de que el contacto reactivo/catalizador no se ve favorecido en el proceso de gasificación. Por otro lado, la presencia de óxidos metálicos y óxidos mixtos promovió WGS y reacciones de metanación que consumieron CO como reactivo, liberando productos gaseosos específicos de la reacción tales como CO₂, H₂ y CH₄. (ver Tabla 5)

Otros autores han mostrado catalizadores mejorados para evitar la desactivación de este durante los diferentes ciclos del proceso. El Rh-Pt/CeO₂-SiO₂ promueve las reacciones de reformado del vapor; Pt tiene gran selectividad para H₂ y Rh alta capacidad para romper enlaces O-H, lo que genera un aumento en los rendimientos de H₂ y CO. El uso de CeO₂ evita directamente la desactivación del catalizador, pues sus propiedades redox previenen la formación de coque. (Quiroga *et al.*, 2020)

4.3.2.5 Condiciones de operación para tecnologías termoquímicas

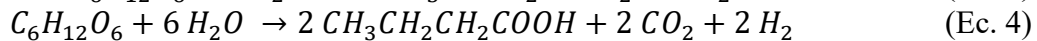
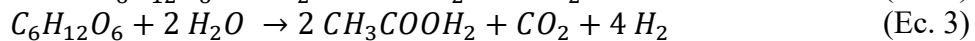
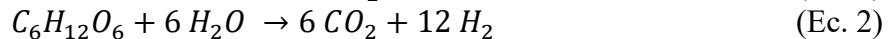
El rendimiento de producción de hidrógeno verde en las tecnologías termoquímicas viene influenciada por diferentes variables; por ejemplo, la temperatura, el agente gasificante, el tipo de catalizador, el tamaño de partícula y la relación de biomasa en la gasificación son factores predominantes. Respecto a la gasificación con aire, el rendimiento de producción de hidrógeno osciló entre 5 y 25 %, en comparación con la gasificación efectuada con vapor, donde se podrían lograr rendimientos de un 20 y 60 % con un pico de producción a 950 °C (Song *et al.*, 2022). Estudios como el de Timofeeva *et al.* (2023) han revelado que, a temperaturas que sobrepasan los 1000 °C, la biomasa se convierte finalmente en escoria y no hay producción de H₂.

En cuanto a la biomasa, cuando esta presenta un alto contenido de cenizas y materia volátil, puede producir más cenizas al final del proceso, provocando escorias y bloqueos en el gasificador. El uso de tamaños de partícula más pequeños, idealmente en el rango de 5 a 20 mm, mejora los rendimientos y la calidad del gas síntesis. Esto se debe a que las partículas más pequeñas tienen una mayor área superficial por unidad de masa, lo que les permite transportar calor y masa de manera más efectiva, mejorando la velocidad de la gasificación y resultando en una mayor producción de H₂ y menor formación de alquitrán (Ghodke *et al.*, 2023). Un ejemplo de esto se presentó en el estudio de Brynda *et al.* (2020); al reducir el tamaño de partícula de 19,05 a 5,00

mm durante la gasificación de madera en un lecho fijo, lograron un aumento del 30 % en la producción de hidrógeno. Esto se atribuyó a la mayor superficie de contacto entre la madera y el vapor, una velocidad de reacción superior (que aumentó de 0.21 a 0.53 g/min) y menor pérdida de calor.

4.3.3 Métodos no convencionales

Dentro de los métodos no convencionales se encuentran la fermentación oscura, la fotofermentación y la electrólisis de biomasa. La fermentación oscura (DF por sus siglas en inglés) es un proceso biológico que implica el uso de bacterias fermentativas en un entorno libre de oxígeno, lo que conduce a la descomposición de sustratos orgánicos; el gas rico en hidrógeno es producido por la neutralización de protones y electrones generados a partir de la oxidación del sustrato, como se evidencia en la Ecuación 1. A pesar de sus ventajas en comparación con tecnologías termoquímicas (alta tasa de producción de hidrógeno, menor uso de energía, tecnología más simple y adaptable), presenta limitaciones significativas como dificultad de escalabilidad, tratamiento previo de la lignocelulosa (hidrólisis: ácida, enzimática, alcalina o biológica) y los costos elevados por la exigencia de los microorganismos. (Martínez-Mendoza *et al.*, 2022) (Zheng *et al.*, 2022) (Li *et al.*, 2022)



En la DF la glucosa se convierte, teóricamente, en 12 moles de hidrógeno (Ec. 2); sin embargo, la generación de subproductos como el ácido acético (Ec. 3), ácido butírico (Ec. 4) y

ácido propiónico (Ec. 4), reduce el rendimiento de producción de hidrogeno a una máximo de 3.47 moles de H₂/mol de glucosa (Tian *et al.*, 2019).

La DF depende tanto de los microorganismos como de la temperatura y el pH, donde estos dos últimos son factores clave que afectan el crecimiento microbiano y, en consecuencia, el rendimiento de hidrogeno. Entre las bacterias más usadas durante este proceso están las *Ethanoligenens*, *Clostridium*s, y *Eschericia coli* (*E. coli*), las cuales desempeñan un papel importante en la fermentación. El rango optimo de temperatura para la velocidad de crecimiento microbiano se encuentra entre 35 y 40 °C en condiciones mesófilas, y de 50 a 60 °C para condiciones termófilas. Así mismo, el pH afecta la estabilidad celular y enzimática, y su rango óptimo es de 5 a 7 dependiendo del microorganismo productor de hidrógeno dominante, así como de las materias primas. (Zhang *et al.*, 2022) (Yukesh *et al.*, 2019) (Tian *et al.*, 2019).

Por otra parte, se han implementado mejoras en el rendimiento de producción de H₂ mediante fotofermentación (PF). La PF requiere la presencia de luz solar o artificial y emplea microorganismos fotosintéticos. Esta tecnología puede combinarse con la DF en un proceso de dos etapas. En la primera parte se utiliza la DF para fermentar la materia orgánica en un reactor anaeróbico, generando H₂ y subproductos (ácido acético y etanol), mientras que en la segunda etapa se recogen los subproductos y se fermentan en un reactor fotobiológico para producir hidrogeno adicional (Zhang *et al.*, 2023).

En la Tabla 9 se identifica el rendimiento de H₂ empleando DF y fotofermentación. Se evidenció que los procesos combinados implican una mayor producción de hidrógeno, pero presentan tiempos de conversión superiores a 8 días (poco rentable a escala industrial). Además, la adición de nanopartículas como catalizadores demostró un rendimiento mayor de H₂ en el proceso, obteniendo un rendimiento de hasta 3412 mlH₂/gVSS en condiciones termófilas

(Srivastava *et al.* 2021). Aunque las temperaturas mesófilas fueron las más comunes en los estudios, Tian *et al.* (2019) demostraron que las condiciones termófilas pueden mejorar el rendimiento de H₂ en la digestión anaeróbica; sin embargo, esta mejora no se aplica de manera uniforme dentro de los diferentes experimentos que se realicen, ya que la actividad de los microorganismos y el pH varía dentro de cada proceso.

Tabla 9

Comparación de diferentes tipos de fermentación y sus condiciones de máximo rendimiento de H₂.

Tipo Fermentación	Biomasa	Condiciones de operación	Rendimiento H₂	Notas	Fuente
Oscura	Residuos de frutas y vegetales	T= 37 °C Tiempo= 48 h PH= 7.5 Bacteria: ácido láctico Concentración Biomasa= 1800mg VSS/L	49.5 ml/gVSS	VSS: sólidos volátiles en suspensión	(Martínez <i>et al.</i> , 2022)
Oscura	Lodos	T= 35 °C Tiempo= 6.5 h PH= 7.1 Bacteria: <i>longilinea</i> y <i>guggenheimella</i> AQS=100 mg/L Biomasa= 1.12gVSS/L	24.9 ml/gVSS	Se introdujo antraquinona-2-sulfonato (AQS) como lanzaderas de electrones en el proceso de fermentación, aumentando el rendimiento de H ₂	(Zhang <i>et al.</i> , 2022)
Oscura + PF	Aguas residuales de efluentes ricos en etanol	T= 35 °C Tiempo= 9 días COD=265 g/L Bacteria: mixta	310 ml/gVSS	COD=demanda química de oxígeno VS= solidos volátiles	(Policastro <i>et al.</i> 2022),
Oscura + PF	Paja de arroz	T= 70 °C Tiempo= 14 días PH= 4.5 Bacteria: <i>bacillus subtilis</i>	3412 ml/gVSS	se usa las nanopartículas NiCo ₂ O ₄ como catalizador. Tasa máxima de	(Srivastava <i>et al.</i> 2021)

Tipo Fermentación	Biomasa	Condiciones de operación	Rendimiento H ₂	Notas	Fuente
		PF_1 y <i>Rhodobacter sp.</i>		Hidrógeno fue 34,12 ml/l en 24 h	
PF	Tallos de maíz	T= 70 °C Tiempo= 72 h PH= 6 Bacterias: <i>rhodospirillum rubrum,</i> <i>R.capsulata,</i> <i>R.pulastris,</i> <i>Rhodobacter sphaeroides,</i> <i>Rhodobacter capsulatus.</i>	5.7 ml/gVSS	Se usó un tampón de fosfato con diferentes tipos de pH, mejorando la producción de H ₂	(Guo <i>et al.</i> 2020)
Oscura	Residuos agrícolas	T= 25 °C Tiempo= 96 h PH= 7 Bacterias: <i>Escenadesmus sp</i>	5.8 ml/gVSS		(Ren <i>et al.</i> 2019)

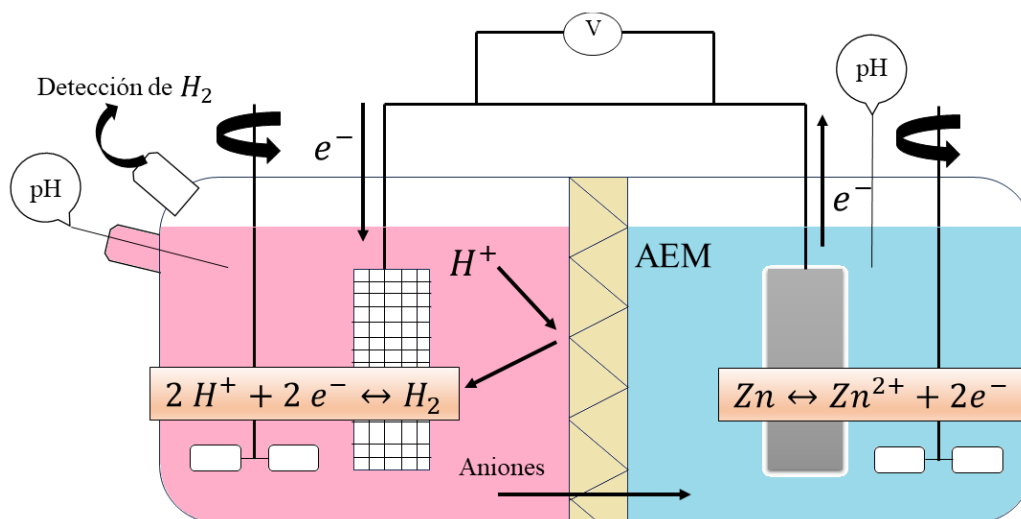
Por otra parte, otro enfoque prometedor para la producción de hidrógeno es la electrólisis de biomasa a través de dos tecnologías diferentes: con una celda de electrólisis microbiana (MEC) y o una celda de electrólisis de membrana de intercambio de protones (PEMEC), tecnología que normalmente se usa para electrolizar agua. Las MEC son especialmente eficientes en la producción de hidrógeno, ofreciendo un rendimiento tres veces mayor en comparación con la fermentación microbiana al aprovechar la oxidación de la materia orgánica por parte de bacterias para liberar electrones, los cuales son transferidos a la celda electrolítica para la generación de H₂. No obstante, la corta vida útil de los microorganismos y la lenta tasa de producción imponen limitaciones al avance de esta tecnología. (Li *et al.*, 2022) (Chavan & Gaikwad, 2023)

Finalmente, Gioannis *et al.* (2023) destacan el rendimiento de combinar la fermentación oscura con una celda galvánica para la producción simultánea de hidrógeno y electricidad.

Mientras la fermentación oscura produce hidrógeno junto con otros gases, como el dióxido de carbono, la celda galvánica se utiliza para capturar los productos generados durante la digestión anaeróbica y convertirlos en hidrógeno. Los investigadores propusieron cuatro tipos de sistemas utilizando suero de queso como biomasa, donde los resultados más prometedores se obtuvieron en el sistema D al integrar digestión anaeróbica y celda galvánica en un solo reactor (ver Figura 7). En este sistema, los residuos orgánicos se fermentan en el mismo compartimento que la celda galvánica, logrando rendimientos de hidrógeno en el rango de 75.5 a 78.8 NL H₂/Kg TOC (la unidad NL H₂/kg TOC se utiliza para expresar la cantidad de hidrógeno producido, en condiciones normales de temperatura y presión, por kilogramo de carbono orgánico total presente en una muestra o sistema). Además, la celda galvánica se utiliza para generar electricidad que alimenta el proceso de DF, lo que resulta en una ganancia neta de energía de 940-1000 kJ/kg TOC y hace al proceso energéticamente sostenible.

Figura 7

Configuración sistema D para la combinación de la fermentación oscura y una celda galvánica



Nota. Adaptado de (Gioannis *et al.*, 2023)

4.3.4 Desafíos y análisis TRL

Inicialmente, se evaluaron las tecnologías siguiendo los diferentes niveles de TRL (ver Apéndice B) de las técnicas termoquímicas y de fermentación oscura; esta clasificación se puede evidenciar en la Tabla 10.

Tabla 10

Niveles TRL de diferentes tecnologías para la producción de hidrógeno verde.

Tipo gasificación	Nivel TRL
En agua supercrítica	4 a 5
En bucle químico	4 a 5
Gasificación por microondas	2 a 3
Gasificación por combustión parcial (pirólisis + gasificación)	2 a 3
Fermentación oscura	2 a 3

En el caso de la gasificación en agua supercrítica se evidenció que posee diversos desafíos como la contaminación de la biomasa residual (Demirel *et al.*, 2021), baja producción de hidrógeno debido al insuficiente contenido de agua y complejidad en la descomposición de la materia lignocelulósica (Chen *et al.*, 2023 ; Wang *et al.*, 2021; Quian *et al.*, 2021; Lu *et al.*, 2019), así como el alto costo de los catalizadores empleados (Salimi *et al.*, 2016) y la presencia de un ambiente corrosivo dentro del proceso por las condiciones supercríticas del agua y la presencia de iónicos metálicos en el proceso. Estos hallazgos respaldan la conclusión de que esta tecnología aún se encuentra en una etapa temprana de desarrollo, subrayando la necesidad de realizar más investigaciones científicas para abordar estos desafíos específicos.

El principal desafío que enfrenta la gasificación en bucle químico radica en la corrosión del equipo, el rendimiento del hidrógeno y los costos elevados de los portadores de oxígeno. Esta problemática se hizo patente durante el análisis de los catalizadores, entre los que se destaca Fe₂O₃CaO como menos eficiente en la gasificación en comparación con el carbón y el coque,

mientras que BaFe₂O₄/Al₂O₃ tiene una vida útil reducida debido a su tendencia a la oxidación. Además, se observó la producción de alquitrán, lo cual genera inconvenientes en cuanto a la seguridad, ya que su acumulación en el sistema podría resultar en un aumento de presión y, por lo tanto, en riesgos de accidentes, además de ser un residuo inflamable y tóxico, lo que afecta el rendimiento del proceso. A esto se suma la necesidad de un control preciso de variables como la temperatura, la presión y la relación de oxígeno/biomasa, para así evitar daños en el equipo y la menor formación de coque en el proceso. Esta técnica ha logrado desarrollar prototipos funcionales, aunque aún se requiere investigación adicional para mejorar su escalabilidad. (Yan *et al.*, 2020) (Hu *et al.*, 2020)

Por otra parte, la gasificación por microondas presenta bajos rendimientos debido a la falta de optimización de las condiciones de diseño (temperatura y tiempo de reacción) del proceso. La temperatura debe ser regulada para evitar la combustión incontrolada en el lecho; sin embargo, esto es difícil de lograr a escala industrial, ya que la temperatura del lecho puede variar de un punto a otro en el reactor. En cuanto a los tiempos de reacción, la gasificación por microondas es más rápida (10 min) respecto a los métodos convencionales (> 30 min); pero, al aumentar el tamaño del reactor a escala industrial, se requieren tiempos de reacción más elevados debido al aumento de la cantidad de biomasa, pues la potencia de microondas se atenúa a medida que viaja a través de esta. Estas condiciones representan su complicada escalabilidad industrial (Lestinsky *et al.*, 2017).

Para los procesos de gasificación por combustión parcial (pirólisis + gasificación), es necesaria una biomasa residual con alto contenido de carbono y baja humedad para lograr mayores rendimientos en la producción de H₂. Por tanto, la selección adecuada del tipo de biomasa se convierte en un desafío central en este proceso (Shahlan *et al.*, 2018) . Además, la falta de

investigación en la preparación eficiente y rápida de catalizadores con alta actividad catalítica y estabilidad (para evitar la desactivación debido al alquitrán) ha obstaculizado su escalabilidad. A pesar de ello, se han identificado algunos catalizadores eficaces, como los óxidos mixtos y óxidos metálicos; sin embargo, la técnica solo ha sido desarrollada a escala laboratorio, probando su funcionalidad en condiciones controladas. (Nanda *et al.*, 2022)

En el caso de las tecnologías no convencionales se presentan desafíos adicionales: selección del sustrato de fermentación adecuado, elección de bacterias que puedan convertir la biomasa de manera efectiva en energía, y los prolongados tiempos necesarios para lograr una conversión completa en hidrógeno (Mirzoyan, *et al.*, 2020). Estas tecnologías han demostrado ser eficientes en escala de laboratorio, lo que indica estar en fase inicial de desarrollo.

Finalmente, en Colombia se emplea carbón y gas natural para la producción de hidrógeno, aunque empresas como Ecopetrol y Promigas han avanzado en la implementación de la producción de hidrógeno verde a partir de biomasa residual en proyectos piloto. No obstante, se han enfrentado a desafíos significativos, incluyendo la necesidad de realizar inversiones que oscilan entre 2.5 y 5.5 billones de dólares, necesarias para la investigación y desarrollo de tecnologías que permitan mejorar el rendimiento de los equipos, así como el transporte, la distribución y la disponibilidad de usos finales accesibles para las empresas (GARCÉS, 2023). Por otra parte, EPM avanza en un piloto funcional con el objetivo de explorar tecnologías para la obtención y aplicación del hidrógeno verde, el cual se produce a partir del biogás generado, actualmente, en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Aguas Claras, situada en el municipio de Bello, Antioquia. El propósito de este piloto radica en la adquisición de conocimientos sobre los costos, usos, eficiencias y rendimiento de la tecnología del hidrógeno, formando parte integral del proceso de transición energética liderado por el Gobierno Nacional. (EPM, 2023)

5 Conclusiones

A partir de la revisión sistemática mediante el uso del protocolo PRISMA, se observó una tendencia creciente de investigaciones en China, representando un 40.63 % del total de las publicaciones incluidas en este estudio. Además, se destaca que la base de datos que albergó la mayor cantidad de investigaciones fue Science Direct, con un total del 75 % de los artículos publicados, donde revistas como *Chemical Engineering Journal*, *International Journal of Hydrogen Energy* y *Energy* son las más destacadas en la divulgación de información. También es relevante mencionar que *Energy Conversion and Management*, junto con las tres fuentes mencionadas anteriormente, cuentan con el mayor número de citas.

Las concentraciones más altas de H₂ en el gas producido se lograron a través de la gasificación por combustión parcial, alcanzando hasta un 85 % en volumen de hidrógeno. Para lograr estas altas concentraciones es necesario tener un catalizador eficiente (óxidos bimetálicos) para aumentar la velocidad de las reacciones, altas temperaturas para eliminar contaminantes (entre 850 °C y 1000 °C) y un agente gasificante adecuado (vapor) para mejorar el rendimiento de producción de H₂. Además, el reactor de lecho fluidizado se considera la configuración más adecuada, ya que su cama de partículas en constante movimiento asegura una distribución uniforme del material reactivo y el calor. En lo que respecta al tipo de biomasa, aquellas con alto contenido de carbono y bajos niveles de humedad, características que se encuentran comúnmente en los residuos de madera, ofrecen mayor rendimiento. Con base en esto, se puede concluir que los métodos para la producción de hidrógeno verde más efectivos y con mayor potencial para su escalabilidad industrial son los termoquímicos.

Finalmente, se encontró que las distintas tecnologías aún se encuentran en una etapa temprana de desarrollo, centradas en la creación de prototipos con miras a su futura escalabilidad.

Esto se debe a la persistencia de desafíos como costos operativos muy altos y un rendimiento limitado (< 60%) en la producción de hidrógeno, la cual depende de factores como la composición de la biomasa residual, el tipo de catalizador utilizado, la temperatura y la técnica a implementar. En los últimos años, surgido un interés creciente en la exploración de tecnologías innovadoras como la gasificación en agua supercrítica, de bucle químico y la combustión parcial; no obstante, esto sugiere la necesidad de investigaciones más detalladas dentro del control del proceso (tipo de biomasa, catalizador y temperaturas adecuadas), el rendimiento de los equipos, así como el transporte y su distribución para abordar estos desafíos de manera efectiva.

6 Recomendaciones

Complementar la revisión sistemática con un análisis económico y energético de la producción de hidrógeno verde a partir de biomasa residual. Esto permitiría la identificación de los factores que inciden en el costo de producción del hidrógeno, así como en los impactos ambientales y socioeconómicos asociados a esta tecnología.

Por último, se recomienda un análisis orientado a las fuentes de biomasa disponibles en Colombia, los avances en las tecnologías de producción de hidrógeno verde y las políticas públicas que respaldan su desarrollo.

Referencias bibliográficas

- Ersöz, A., DurakÇetin, Y., Sarioglan, A., Turan, A., Mert, M., Yüksel, F., . . . Baykara, S. (2018). Investigation of a novel & integrated simulation model for hydrogen production from lignocellulosic biomass. *International Journal of Hydrogen Energy*, *43*, 1081-1093. doi:10.1016/j.ijhydene.2017.11.017
- Anonimo. (02 de 08 de 2021). *Ayming*. (Coast Digital) Recuperado el 15 de 17 de 2023, de <https://www.ayming.es/insights-y-noticias/noticias/trl-technology-readiness-levels/#9>
- Barisano, D., Canneto, G., Nanna, F., Villone, A., Fanelli, E., Freda, C., . . . Heidenreich, S. (2021). Investigation of an Intensified Thermo-Chemical Experimental Set-Up for Hydrogen Production from Biomass: Gasification Process Performance-Part I. *PROCESSES*, *9*, 10104. doi:10.3390/pr9071104
- Bunma, T., & Kuchonthara, P. (2018). Synergistic study between CaO and MgO sorbents for hydrogen rich gas production from the pyrolysis-gasification of sugarcane leaves. *PROCESS SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION*, *118*, 108-194. doi:10.1016/j.psep.2018.06.034
- Cao, L., Yu, I., Xiong, X., Tsang, D., Zhang, S., Clark, J., . . . Ok, Y. (2020). Biorenewable hydrogen production through biomass gasification: A review and future prospects. *Environmental Research*, *186*, 109547. doi:10.1016/j.envres.2020.109547
- Casademont, P., Cardozo-Filho, L., Meurer, E., Sánchez-Oneto, J., & Portela, J. (2018). Gasification of olive oil mill waste by supercritical water in a continuous reactor. *Journal of Supercritical Fluids*, *142*, 10-21. doi:10.1016/j.supflu.2018.06.001

- Chai, Y., Gao, N., Wang, M., & Wu, C. (2020). H-2 production from co-pyrolysis/gasification of waste plastics and biomass under novel catalyst Ni-CaO-C. *CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL*, 382, 122947. doi:10.1016/j.cej.2019.122947
- Chai, Y., Wang, M., Gao, N., Duan, Y., & Li, J. (2020). Experimental study on pyrolysis/gasification of biomass and plastics for H-2 production under new dual-support catalyst. *CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL*, 396, 125260. doi:10.1016/j.cej.2020.125260
- Chavan, S., & Gaikwad, A. (2023). Hydrogen generation from bamboo biomass using enzymatic hydrolysis and subsequent microbial electrolysis in a single chamber microbial electrolysis cell. *BIOCHEMICAL ENGINEERING JOURNAL*, 193, 108853. doi:10.1016/j.bej.2023.108853
- Chen, J., Wang, C., Shang, W., Bai, Y., & Wu, X. (2023). Study on the mechanisms of hydrogen production from alkali lignin gasification in supercritical water by ReaxFF molecular dynamics simulation. *Energy*, 278, 127900. doi:10.1016/j.energy.2023.127900
- Chi Cheng Chong, Y. W.-V. (2022). Bio-hydrogen production from steam reforming of liquid biomass wastes and biomass-derived oxygenates: A review. *Fuel*, 122623. doi:10.1016/j.fuel.2021.122623
- Cui Wang, L. L. (2021). Supercritical water gasification of wheat straw: Composition of reaction products and kinetic study. *Energy*, 120449. doi:10.1016/j.energy.2021.120449
- De Gioannis, G., Dell'Era, A., Muntoni, A., Pasquali, M., Polettini, A., Pomi, R., . . . Zonfa, T. (2023). Bio-electrochemical production of hydrogen and electricity from organic waste:

preliminary assessment. *CLEAN TECHNOLOGIES AND ENVIRONMENTAL POLICY*, 25, 269–280. doi:10.1007/s10098-022-02305-1

Demirel, E., Erkey, C., & Ayas, N. (2021). Supercritical water gasification of fruit pulp for hydrogen production: Effect of reaction parameters. *Journal of Supercritical Fluids*, 177, 105329. doi:10.1016/j.supflu.2021.105329

Dong, L., Wu, C., Ling, H., Shi, J., Williams, P., & Huang, J. (2017). Development of Fe-Promoted Ni-Al Catalysts for Hydrogen Production from Gasification of Wood Sawdust. *Energy and Fuels*, 31, 2118-2127. doi:10.1021/acs.energyfuels.6b02050

Elmagarmid, A. F. (2014). Rayyan: A systematic reviews web app for exploring and filtering searches for eligible studies for Cochrane Reviews. *In Evidence-Informed Public Health: Opportunities and Challenges*.

EPM. (15 de 06 de 2023). *Noticias y novedades EPM*. Obtenido de <https://cu.epm.com.co/institucional/sala-de-prensa/noticias-y-novedades/internanoticia/en-la-planta-aguas-claras-epm-adelanta-su-primer-piloto-de-hidrogeno-verde-en-colombia>

Esfahani, R. A., Osmieri, L., Specchia, S., Yusup, S., Tavasoli, A., & Zamaniyan, A. (2017). H-2-rich syngas production through mixed residual biomass and HDPE waste via integrated catalytic gasification and tar cracking plus bio-char upgrading. *CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL*, 308, 578-587. doi:10.1016/j.cej.2016.09.049

Frank Sebastián Villa Lobo, M. F. (2022). *ADSORCIÓN DE ANIONES NITRATO Y FOSFATO DE*

AGUAS RESIDUALES PROVEIENTES DEL SECTOR AGRÍCOLA. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Furkan Kartal, U. Ö. (2021). A comparative study for biomass gasification in bubbling bed gasifier using Aspen HYSYS. *Bioresource Technology Reports*, 100615.

doi:10.1016/j.biteb.2020.100615

GARCÉS, C. C. (28 de 07 de 2023). *La república*. Obtenido de

<https://www.larepublica.co/especiales/desafios-energeticos/colombia-producira-hidrogeno-verde-entre-1-a-3-gw-a-2030-3667061>

Ghodke, P., Sharma, A., Jayaseelan, A., & Gopinath, K. (2023). Hydrogen-rich syngas production from the lignocellulosic biomass by catalytic gasification: A state of art review on advance technologies, economic challenges, and future prospectus. *Fuel*, 342, 127800.

doi:10.1016/j.fuel.2023.127800

Guo, S., Lu, C., Wang, K., Wang, J., Zhang, Z., Jing, Y., & Zhang, Q. (2020). Enhancement of pH values stability and photo-fermentation biohydrogen production by phosphate buffer.

Bioengineered, 11, 291-300. doi:10.1080/21655979.2020.1736239

Han, T., Yang, W., & Jonsson, P. G. (2020). Pyrolysis and subsequent steam gasification of metal dry impregnated lignin for the production of H₂-rich syngas and magnetic activated carbon. *CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL*, 394. doi:10.1016/j.cej.2020.124902

Heshan Zheng, Y. W.-S. (2022). Renewable biohydrogen production from straw biomass – Recent advances in pretreatment/hydrolysis technologies and future development.

International Journal of Hydrogen Energy, 47, 37359-37373.

doi:10.1016/j.ijhydene.2021.10.020

Hu, M., Guo, D., Ma, C., Luo, S., Chen, X., Cheng, Q., . . . Xiao, B. (2016). A novel pilot-scale production of fuel gas by allothermal biomass gasification using biomass micron fuel (BMF) as external heat source. *CLEAN TECHNOLOGIES AND ENVIRONMENTAL POLICY*, 18, 743-751. doi:10.1007/s10098-015-1038-2

Hu, Q., Shen, Y., Chew, J., Ge, T., & Wang, C.-H. (2020). Chemical looping gasification of biomass with Fe₂O₃/CaO as the oxygen carrier for hydrogen-enriched syngas production.

Chemical Engineering Journal, 379, 122346. doi:10.1016/j.cej.2019.122346

Hussain, M., Zabiri, H., Uddin, F., Yusup, S., & Tufa, L. (2023). Pilot-scale biomass gasification system for hydrogen production from palm kernel shell (part A): steady-state simulation.

Biomass Conversion and Biorefinery, 13, 3849-3862. doi:10.1007/s13399-021-01474-1

Jamro, I., Kumar, A., Khoso, S., Ahmad, M., Baloch, H., Raheel Shah, S., . . . Ma, W. (2023).

Investigation of optimum H₂ production from date palm waste leaves using different modeling tools. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48.

doi:10.1016/j.ijhydene.2023.03.053

Jayachitra Murugaiyan, A. N. (2022). Una descripción general de la configuración de la celda de electrólisis microbiana: desafíos y perspectivas en la producción de biohidrógeno.

Energy Research, 46(14), 20811- 20827.

- Jin, F., Sun, H., Wu, C., Ling, H., Jiang, Y., Williams, P., & Huang, J. (2018). Effect of calcium addition on Mg-ALOX supported Ni catalysts for hydrogen production from pyrolysis-gasification of biomass. *Catalysis Today*, *18*, 2-10. doi:10.1016/j.cattod.2018.01.004
- Jin-Rong Huang a, X. C.-B.-R.-J. (2022). Bioaugmentation combined with biochar to enhance thermophilic hydrogen production from sugarcane bagasse. *Bioresource Technology*, *348*. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126790.
- Jiří Brynda, S. S. (2020). Wood chips gasification in a fixed-bed multi-stage gasifier for decentralized high-efficiency CHP and biochar production: Long-term commercial operation. *Fuel*, *281*, 118637. doi:10.1016/j.fuel.2020.118637
- José Juan Bolívar Caballero, I. N. (2022). Reforming processes for syngas production: A mini-review on the current status, challenges, and prospects for biomass conversion to fuels. *Applications in Energy and Combustion Science*, *10*, 100064. doi:10.1016/j.jaecs.2022.100064
- Jun, Z., Shuzhong, W., Zhiqiang, W., Haiyu, M., & Lin, C. (2017). Hydrogen-rich syngas produced from the co-pyrolysis of municipal solid waste and wheat straw. *International Journal of Hydrogen Energy*, *42*, 19701- 19708. doi:10.1016/j.ijhydene.2017.06.166
- Karaeva, J., Timofeeva, S., Kovalev, A., Kovalev, D., Gilfanov, M., Grigoriev, V., & Litt, Y. (2022). CO-PYROLYSIS of agricultural waste and estimation of the applicability of pyrolysis in the integrated technology of biorenewable hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, *47*, 11787-11798. doi:10.1016/j.ijhydene.2022.02.057

- Leichang Cao, I. K. (2020). Biorenewable hydrogen production through biomass gasification: A review and future prospects. *Environmental Research*, 109547.
doi:10.1016/j.envres.2020.109547
- Lestinsky, P., Grycova, B., Prysycz, A., Martaus, A., & Matejova, L. (2017). Hydrogen production from microwave catalytic pyrolysis of spruce sawdust. *Hydrogen production from microwave catalytic pyrolysis of spruce sawdust*, 124, 175-179.
doi:10.1016/j.jaap.2017.02.008
- Li, M., Wang, T., Zhao, M., & Wang, Y. (2022). Research on hydrogen production and degradation of corn straw by circular electrolysis with polyoxometalate (POM) catalyst. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47. doi:10.1016/j.ijhydene.2021.11.111
- Lu, Y., Jin, H., & Zhang, R. (2019). Evaluation of stability and catalytic activity of Ni catalysts for hydrogen production by biomass gasification in supercritical water. *Carbon Resources Conversion*, 2, 95-101. doi:10.1016/j.crcon.2019.03.001
- Marco Buffi, M. P. (2022). Energy and environmental assessment of hydrogen from biomass sources: Challenges and perspectives. *Biomass and Bioenergy*, 165.
doi:https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106556
- Martinez-Mendoza, L., Lebrero, R., Muñoz, R., & Garcia-Depraect, O. (2022). Influence of key operational parameters on biohydrogen production from fruit and vegetable waste via lactate-driven dark fermentation. *Bioresource Technology*, 364.
doi:10.1016/j.biortech.2022.128070

- Matthew J. Page a, J. E. (2021). Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista española de cardiología*, 790-799.
doi:10.1016/j.recesp.2021.06.016
- Mirzoyan, S., Toleugazykyzy, A., Bekbayev, K., Trchounian, A., & Trchounian, K. (2020). Enhanced hydrogen gas production from mixture of beer spent grains (BSG) and distiller's grains (DG) with glycerol by *Escherichia coli*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45.
doi:10.1016/j.ijhydene.2020.04.207
- Nanda, S., Isen, J., Dalai, A., & Kozinski, J. (2016). Gasification of fruit wastes and agro-food residues in supercritical water. *Energy Conversion and Management*, 110, 296-306.
doi:10.1016/j.enconman.2015.11.060
- Nanda, S., Okolie, J., Patel, R., Pattnaik, F., Fang, Z., Dalai, A., . . . Naik, S. (2022). Catalytic hydrothermal co-gasification of canola meal and low-density polyethylene using mixed metal oxides for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47.
doi:10.1016/j.ijhydene.2021.08.179
- Noblecourt, A., Christophe, G., Larroche, C., Santa-Catalina, G., Trably, E., & Fontanille, P. (2017). High hydrogen production rate in a submerged membrane anaerobic bioreactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 2203-2215.
doi:10.1016/j.ijhydene.2017.08.037
- Okolie, J., Nanda, S., Dalai, A., & Kozinski, J. (2020). Hydrothermal gasification of soybean straw and flax straw for hydrogen-rich syngas production: Experimental and thermodynamic

modeling. *Energy Conversion and Management*, 208, 112545.

doi:10.1016/j.enconman.2020.112545

Policastro, G., Giugliano, M., Luongo, V., Napolitano, R., & Fabbricino, M. (2022). Enhancing photo fermentative hydrogen production using ethanol rich dark fermentation effluents. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 117-126.

doi:10.1016/j.ijhydene.2021.10.028

Porcu, A., Xu, Y., Mureddu, M., Dessì, F., Shahnam, M., Rogers, W., . . . Pettinau, A. (2021). Experimental validation of a multiphase flow model of a lab-scale fluidized-bed gasification unit. *Applied Energy*, 293, 116933. doi:10.1016/j.apenergy.2021.116933

Prakash Ariel, V. d. (2023). Oxidative catalytic steam gasification of sugarcane bagasse for hydrogen rich syngas production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(40), 15014-15025. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.340>

Prasertcharoensuk, P., Bull, S. J., Arpornwichanop, A., & Phan, A. N. (2021). Sustainable Hydrogen Production from Waste Wood and CO₂. *INDUSTRIAL & ENGINEERING CHEMISTRY RESEARCH*, 60, 12362-12376. doi:10.1021/acs.iecr.1c01810

Prasertcharoensuk, P., Bull, S. J., Arpornwichanop, A., & Phan, A. N. (2021). Sustainable Hydrogen Production from Waste Wood and CO₂. *INDUSTRIAL & ENGINEERING CHEMISTRY RESEARCH*, 60, 12362-12376. doi:10.1021/acs.iecr.1c01810

Praveen Kumar Ghodke, A. K. (2023). Hydrogen-rich syngas production from the lignocellulosic biomass by catalytic gasification: A state of art review on advance technologies,

economic challenges, and future prospectus. *Fuel*, 342, 127800.

doi:10.1016/j.fuel.2023.127800

Purnami Purnami, E. S. (2021). Mejora de la producción de hidrógeno utilizando un campo magnético dinámico a través de la electrólisis del agua. *Universidad Brawijaya, Malang, Indonesia*.

Qian, L., Wang, S., Wang, S., Zhao, S., & Zhang, B. (2021). Supercritical water gasification and partial oxidation of municipal sewage sludge: An experimental and thermodynamic study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 89-99.

doi:10.1016/j.ijhydene.2020.09.200

Qin, W., Luo, L., Chen, S., Iqbal, T., Xiao, X., & Dong, C. (2021). Efficient strategy of utilizing alkaline liquid waste boosting biomass chemical looping gasification to produce hydrogen. *Fuel Processing Technology*, 217, 106818. doi:10.1016/j.fuproc.2021.106818

Quiroga, E., Molto, J., Conesa, J., Valero, M., & Cobo, M. (2020). Kinetics of the catalytic thermal degradation of sugarcane residual biomass over Rh-Pt/CeO₂-SiO₂ for Syngas production. *Catalysts*, 10. doi:10.3390/catal10050508

R. A. Khan, A. K. (2022). Gasification of biomass for hydrogen production: A review of recent advances. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

Ren, H., Kong, F., Zhao, L., Ren, N., Ma, J., Nan, J., & Liu, B. (2019). Enhanced co-production of biohydrogen and algal lipids from agricultural biomass residues in long-term operation. *Bioresource Technology*, 289, 17233-17240. doi:10.1016/j.biortech.2019.121774

- Rodriguez-Valderrama, S., Escamilla-Alvarado, C., Magnin, J.-P., Rivas-Garcia, P., Valdez-Vazquez, I., & Rios-Leal, E. (2020). Batch biohydrogen production from dilute acid hydrolyzates of fruits-and-vegetables wastes and corn stover as co-substrates. *Biomass and Bioenergy*, *140*, 105666. doi:10.1016/j.biombioe.2020.105666
- S.S. Timofeeva, J. K. (2023). Steam gasification of digestate after anaerobic digestion and dark fermentation of lignocellulosic biomass to produce syngas with high hydrogen content. *International Journal of Hydrogen Energy*, *48*, 7559-7568. doi:10.1016/j.ijhydene.2022.11.260
- Salimi, M. N. (2016). Hydrothermal gasification performance of iranian rice straw in supercritical water media for hydrogen-rich gas production. *BioResources*, *11*(3), 6362- 6377. doi:10.15376/biores.11.3.6362-6377
- Samimi, F., Marzoughi, T., & Rahimpour, M. (2020). Energy and exergy analysis and optimization of biomass gasification process for hydrogen production (based on air, steam and air/steam gasifying agents). *International Journal of Hydrogen Energy*, *45*, 33785-33197. doi:10.1016/j.ijhydene.2020.09.131
- Shahbaz, M., Taqvi, S. A., Inayat, M., Inayat, A., Sulaiman, S. A., McKay, G., & Al-Ansari, T. (2020). Air catalytic biomass (PKS) gasification in a fixed-bed downdraft gasifier using waste bottom ash as catalyst with NARX neural network modelling. *COMPUTERS & CHEMICAL ENGINEERING*, *142*, 107048. doi:10.1016/j.compchemeng.2020.107048
- Shahlan, S., Kidam, K., Medic-Pejic, L., Abdullah, T., Ali, M., & Zakaria, Z. (2018). Process development of oil palm empty fruit bunch gasification by using fluidised bed reactor for

hydrogen gas production. *Chemical Engineering Transactions*, 63, 559–564.

doi:10.3303/CET1863094

Si, X., Zhao, Z., Chen, J., Lu, R., & Lu, F. (2022). Low-Temperature Efficient Hydrogen Production from Raw Biomass on the Ni-Mo Catalyst. *ACS Catalysis*, 12.

doi:10.1021/acscatal.2c02706

Sierra, W. F. (2022). *Estudio de vigilancia científica del desarrollo de alternativas tecnológicas anticorrosivas sobre acero al carbono de uso en la industria petroquímica*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Singh, A., Shivapuji, A., & Dasappa, S. (2023). VPSA process characterization for ISO quality green hydrogen generation using two practical multi-component biomass gasification feeds. *Separation and Purification Technology*, 315, 123667.

doi:10.1016/j.seppur.2023.123667

Singh, N. K., & Singh, R. (2023). Hydrogen recovery cascade from pretreated rice straw and its fermentative residuals using step-up potential-based sulfate reducing bacteria-bioelectrochemical system. *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 408, 137167.

doi:10.1016/j.jclepro.2023.137167

Song, H., Yang, G., Xue, P., Li, Y., Zou, J., Wang, S., . . . Chen, H. (2022). Recent development of biomass gasification for H₂ rich gas production. *Applications in Energy and Combustion Science*, 10, 100059. doi:10.1016/j.jaecs.2022.100059

- Srivastava, N., Mohammad, A., Srivastava, M., Syed, A., Elgorban, A., Bahadur Pal, D., . . . Gupta, V. (2021). Biogenic enabled in-vitro synthesis of nickel cobaltite nanoparticle and its application in single stage hybrid biohydrogen production. *Bioresource Technology*, *342*, 126006. doi:10.1016/j.biortech.2021.126006
- Sui, M., Li, G., Guan, Y., Li, C., Zhou, R., & Zarnegar, A. (2020). Hydrogen and syngas production from steam gasification of biomass using cement as catalyst. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *10*, 119-124. doi:10.1007/s13399-019-00404-6
- Tian, H. a.-H. (2019). Organic waste to biohydrogen: A critical review from technological development and environmental impact analysis perspective. *Applied Energy*, *256*. doi:10.1016/j.apenergy.2019.113961
- Tomasek, S., Egedy, A., Bocsi, R., Zou, J., Zhao, Y., Haiping, Y., & Miskolczi, N. (2022). Response surface modelling of biomass-rich municipal solid waste pyrolysis: towards optimum hydrogen production. *CLEAN TECHNOLOGIES AND ENVIRONMENTAL POLICY*, *24*, 2825–2835. doi:10.1007/s10098-022-02358-2
- Torres, D. A. (2022). *Desarrollo de Recubrimientos Híbridos como alternativa a la metalización de empaques plásticos de alimentos: Estudio de vigilancia científica*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander .
- Van Giao Nguyen, T. X.-T. (2023). Recent advances in hydrogen production from biomass waste with a focus on pyrolysis and gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*. doi:10.1016/j.ijhydene.2023.05.049

Waluyo, J., Ruya, P., Hantoko, D., Rizkiana, J., Makertihartha, I. G., Yan, M., & Susanto, H. (2021).

Utilization of Modified Zeolite as Catalyst for Steam Gasification of Palm Kernel Shell.

BULLETIN OF CHEMICAL REACTION ENGINEERING AND CATALYSIS, 16.

doi:10.9767/bcrec.16.3.10837.623-631

Wang, C., Li, L., Chen, Y., Ge, Z., & Jin, H. (2021). Supercritical water gasification of wheat straw:

Composition of reaction products and kinetic study. *Energy*, 227, 120449.

doi:10.1016/j.energy.2021.120449

Wen Cao, L. G. (2018). Assessment of sugarcane bagasse gasification in supercritical water for

hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(30), 13711-13719.

Wu, L., Ma, H., Yan, Z., Xu, Q., & Li, Z. (2022). Improving catalyst performance of Ni-CaO-C to

enhance H₂ production from biomass steam gasification through induction heating technology. *Energy Conversion and Management*, 270, 116242.

doi:10.1016/j.enconman.2022.116242

Yan, J., Sun, R., Shen, L., Bai, H., Jiang, S., Xiao, Y., & Song, T. (2020). Hydrogen-rich syngas

production with tar elimination via biomass chemical looping gasification (BCLG) using BaFe as oxygen carrier. *Chemical Engineering Journal*, 387, 124107.

doi:10.1016/j.cej.2020.124107

Yoon, K., Lee, S., Ok, Y., Kwon, E., & Song, H. (2019). Enhancement of syngas for H₂ production

via catalytic pyrolysis of orange peel using CO₂ and bauxite residue. *Applied Energy*, 254,

113803. doi:10.1016/j.apenergy.2019.113803

- Yue, W., Ma, X., Yu, Z., Liu, H., Li, M., & Lu, X. (2023). Ni-CaO bifunctional catalyst for biomass catalytic pyrolysis to produce hydrogen-rich gas. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 169, 105872. doi:10.1016/j.jaap.2023.105872
- Yukesh Kannah, R., Kavitha, S., Sivashanmugham, P., Kumar, G., Nguyen, D., Chang, S., & Rajesh Banu, J. (2019). Biohydrogen production from rice straw: Effect of combinative pretreatment, modelling assessment and energy balance consideration. *International Journal of Hydrogen Energy*, 289, 121774. doi:10.1016/j.ijhydene.2018.07.201
- Zeng, J., Xiao, R., & Yuan, J. (2021). High-quality syngas production from biomass driven by chemical looping on a PY-GA coupled reactor. *Energy*, 214, 118846. doi:10.1016/j.energy.2020.118846
- Zhang, G. a. (2023). Latest avenues and approaches for biohydrogen generation from algal towards sustainable energy optimization: Recent innovations, artificial intelligence, challenges, and future perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(55), 20988-21003. doi:10.1016/j.ijhydene.2022.10.224
- Zhang, J., & Niu, Y. (2021). Biomass to hydrogen-rich syngas via tar removal from steam gasification with La₁-xCe_xFeO₃/dolomite as a catalyst. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 21997-22009. doi:10.1016/j.ijhydene.2022.05.022
- Zhang, L., Ban, Q., Li, J., & Zhang, S. (2022). An enhanced excess sludge fermentation process by anthraquinone-2-sulfonate as electron shuttles for the biorefinery of zero-carbon hydrogen. *Environmental Research*, 210, 113005. doi:10.1016/j.envres.2022.113005

- Zhao, B., Song, G., Zhou, W., Chen, L., Sun, L., Yang, S., . . . Yang, H. (2020). Catalytic Pyrolysis of Herb Residues for the Preparation of Hydrogen-Rich Gas. *Energy and Fuels*, *34*, 1131-1136. doi:10.1021/acs.energyfuels.9b02177
- Zhao, B., Yang, H., Zhang, H., Zhong, C., Wang, J., Zhu, D., . . . Xie, H. (2021). Study on hydrogen-rich gas production by biomass catalytic pyrolysis assisted with magnetic field. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *157*, 105227. doi:10.1016/j.jaap.2021.105227
- Zheng, J., Zhang, Y., Yang, M., Xue, F., Liu, R., & Li, C. (2023). Hydrogen-rich syngas production via sorption-enhanced steam gasification of biomass using FeCaO bi-functional materials. *Energy*, *281*, 128269. doi:10.1016/j.energy.2023.128269
- Zhu, B.-B. H.-J. (2017). Direct hydrogen production from dilute-acid pretreated sugarcane bagasse hydrolysate using the newly isolated Thermoanaerobacterium thermosaccharolyticum MJ. *Springer link*.
- Zhu, G., Huang, J., Wan, Z., Ling, H., & Xu, Q. (2022). Cow Dung Gasification Process for Hydrogen Production Using Water Vapor as Gasification Agent. *PROCESSES*, *10*, 1257. doi:10.3390/pr10071257
- Zou, S., Dong, W., Cheng, B., Zhang, Y., Williams, P., & Zhao, M. (2021). Hybrid-functional material for sorption-enhanced hydrogen-rich syngas production from biomass: Effect of material preparation process. *Biomass and Bioenergy*, *144*, 105886. doi:10.1016/j.biombioe.2020.105886

Apéndices

Apéndice A. Items metodología PRISMA

Sección/tema	Ítem	Ítem de la lista de verificación
TÍTULO		
Título	1	Identificar la publicación como una revisión sistemática.
RESUMEN		
Resumen estructurado	2	Ver la lista de verificación para resúmenes estructurados de la declaración PRISMA 2020.
INTRODUCCIÓN		
Justificación	3	Describir la justificación de la revisión en el contexto del conocimiento existente.
Objetivos	4	Proporcionar una declaración explícita de los objetivos o las preguntas que aborda la revisión.
MÉTODOS		
Criterios de elegibilidad	5	Especificar los criterios de inclusión y exclusión de la revisión y cómo se agruparon los estudios para la síntesis.
Fuentes de información	6	Enumerar y detallar todas las fuentes de búsqueda utilizadas, incluyendo bases de datos, registros, sitios web y organizaciones, junto con la última fecha de consulta.
Estrategia de búsqueda	7	Mostrar las estrategias de búsqueda detalladas para todas las fuentes, incluyendo filtros y restricciones aplicados.
Proceso de selección de los estudios	8	Describir cómo se evaluaron los estudios para determinar si cumplen con los criterios de inclusión, incluyendo el número de revisores, su independencia y cualquier uso de herramientas de automatización.
Proceso de extracción de los datos	9	Describir cómo se obtuvieron los datos de los informes o publicaciones, incluyendo el número de revisores, su independencia, la validación de los datos por parte de los investigadores del estudio y el uso de herramientas de automatización, si las hubo.
Lista de los datos	10a	Enumerar y explicar todos los resultados buscados, especificando si se incluyeron todos los relacionados con cada aspecto del resultado. en caso de no ser así, explicar el proceso de selección de resultados.
	10b	Enumerar y definir otras variables de interés, como características de participantes e intervención, así como fuentes de financiamiento. Explicitar cualquier suposición realizada sobre datos faltantes o inciertos.
Evaluación del riesgo de sesgo de los estudios individuales	11	Describir los métodos de evaluación del sesgo en los estudios incluidos, incluyendo las herramientas, el número de revisores, su independencia y, si corresponde, detalles sobre la automatización.

Sección/tema	Ítem	Ítem de la lista de verificación
Medidas del efecto	12	Indicar las medidas de efecto (por ejemplo, razón de riesgos, diferencia de medias) utilizadas para cada resultado en la síntesis de los resultados.
Métodos de síntesis	13a	Explicar cómo se seleccionaron los estudios elegibles para la síntesis, como comparar las características de los estudios con los grupos previstos para cada síntesis.
	13b	Describir cualquier método necesario para preparar los datos, como el tratamiento de datos faltantes o conversiones, antes de su presentación o síntesis.
	13c	Describir los métodos utilizados para tabular o presentar visualmente los resultados de los estudios individuales y su síntesis.
	13d	Describir los métodos de síntesis de resultados, justificando las elecciones. en caso de haber un metaanálisis, explicar los modelos, la evaluación de la heterogeneidad y las herramientas informáticas utilizadas.
	13e	Describir los métodos utilizados para explorar las posibles causas de heterogeneidad entre los resultados de los estudios (por ejemplo, análisis de subgrupos, metarregresión).
	13f	Describir los análisis de sensibilidad que se hayan realizado para evaluar la robustez de los resultados de la síntesis.
Evaluación del sesgo en la publicación	14	Describir los métodos utilizados para evaluar el riesgo de sesgo debido a resultados faltantes en una síntesis (derivados de los sesgos en las publicaciones).
Evaluación de la certeza de la evidencia	15	Describir los métodos utilizados para evaluar la certeza (o confianza) en el cuerpo de la evidencia para cada desenlace.
RESULTADOS		
Selección de los estudios	16a	Describir los resultados de los procesos de búsqueda y selección, desde el número de registros identificados en la búsqueda hasta el número de estudios incluidos en la revisión, idealmente utilizando un diagrama de flujo.
	16b	Citar los estudios que aparentemente cumplían con los criterios de inclusión, pero que fueron excluidos, y explique por qué fueron excluidos.
Características de los estudios	17	Citar cada estudio incluido y presente sus características.
Riesgo de sesgo de los estudios individuales	18	Presentar las evaluaciones del riesgo de sesgo para cada uno de los estudios incluidos.
Resultados de los estudios individuales	19	Presentar para todos los desenlaces y para cada estudio: a) los estadísticos de resumen para cada grupo (si procede) y b) la estimación del efecto y su precisión (por ejemplo, intervalo de credibilidad o de confianza), idealmente utilizando tablas estructuradas o gráficos.

Sección/tema	Ítem	Ítem de la lista de verificación
Resultados de la síntesis	20a	Para cada síntesis, resumir brevemente las características y el riesgo de sesgo entre los estudios contribuyentes.
	20b	Mostrar los resultados del metaanálisis, incluyendo el estimador de resumen, su precisión (como intervalos de credibilidad o de confianza) y las medidas de heterogeneidad estadística. Si se comparan grupos, describir la dirección del efecto.
	20c	Presente los resultados de todas las investigaciones sobre las posibles causas de heterogeneidad entre los resultados de los estudios.
	20d	Presente los resultados de todos los análisis de sensibilidad realizados para evaluar la robustez de los resultados sintetizados.
Sesgos en la publicación	21	Presente las evaluaciones del riesgo de sesgo debido a resultados faltantes (derivados de los sesgos de en las publicaciones) para cada síntesis evaluada.
Certeza de la evidencia	22	Presente las evaluaciones de la certeza (o confianza) en el cuerpo de la evidencia para cada desenlace evaluado.
DISCUSIÓN		
Discusión	23a	Proporcionar una interpretación general de los resultados en el contexto de otras evidencias.
	23b	Argumentar las limitaciones de la evidencia incluida en la revisión.
	23c	Argumentar las limitaciones de los procesos de revisión utilizados.
	23d	Argumentar las implicaciones de los resultados para la práctica, las políticas y las futuras investigaciones.
OTRA INFORMACIÓN		
Registro y protocolo	24a	Proporcionar la información del registro de la revisión, incluyendo el nombre y el número de registro, o declarar que la revisión no ha sido registrada.
	24b	Indicar dónde se puede acceder al protocolo, o declarar que no se ha redactado ningún protocolo.
	24c	Describir y explicar cualquier enmienda a la información proporcionada en el registro o en el protocolo.
Financiación	25	Describir las fuentes de apoyo financiero o no financiero para la revisión y el papel de los financiadores o patrocinadores en la revisión.
Conflicto de intereses	26	Declarar los conflictos de intereses de los autores de la revisión.
Disponibilidad de datos, códigos y otros materiales	27	Indicar qué elementos de los siguientes están públicamente disponibles y dónde encontrarlos: plantillas de extracción de datos, datos extraídos de estudios incluidos, datos para análisis, código de análisis y otros materiales utilizados en la revisión.

Apéndice B. Niveles de maduración tecnológica TRL.

Nivel TRL	Descripción
1	Se encuentran los estudios donde muestran la tecnología como una idea o concepto y no hay evidencia experimental o teórica de la misma
2	En este nivel la tecnología se ha formulado de manera precisa y se han identificado los principios científicos que hacen posible la viabilidad de la tecnología.
3	en el presente nivel, la tecnología se ha probado a escala laboratorio comprobando su funcionalidad en condiciones controladas.
4	se ha construido un prototipo funcional, se ha probado en condiciones controladas.
5	en este nivel la tecnología se ha probado que funciona en condiciones reales.
6	en este nivel el sistema se ha construido y probado en un entorno relevante (entorno cerrado)
7	el sistema se ha probado en un entorno operativo, donde se evidencia que puede ser utilizado por usuarios finales.
8	aquí el sistema se ha fabricado demostrando su viabilidad para ser aplicado en un entorno operativo, donde dicha tecnología puede ser aplicada de manera rentable.
9	en este último nivel el sistema ya opera de manera industrial, es económicamente viable y está siendo usado por los usuarios finales en el mercado