




Hidrógeno verde: revisión del estado del arte de las tecnologías de generación para la descarbonización del sector energético

Green hydrogen: a state-of-the-art review of generation technologies for the decarbonisation of the energy sector

Yohan Gerardo Cuellar Pérez¹  Jose Ricardo Bermúdez Santaella¹  Daniel Andrey Herrera Susa² 

¹Laboratorio de Energía, sistemas térmicos e nanotecnología LEST-NANO. Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta, Colombia.

² Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta, Colombia.

Resumen

La creciente preocupación por los problemas ambientales y el agotamiento de los combustibles fósiles ha generado un interés hacia el desarrollo de tecnologías que nos permitan producir electricidad sin necesidad de contaminar el medio ambiente. El hidrógeno en las últimas décadas se ha convertido en el principal candidato para reemplazar a los combustibles fósiles, teniendo la posibilidad de poder utilizarse como combustible primario para quemarse en motores de combustión, o como vector energético para la producción de energía por medio de las pilas de combustible, convirtiéndose en un combustible atractivo por su alta densidad energética y que no emite ningún tipo de contaminación. En la actualidad, el hidrógeno no se produce con fines energéticos, sino industriales, por ello, el propósito de este artículo es conocer las formas predominantes de producción de hidrógeno, que usan combustibles fósiles como materia prima y estudiar las nuevas tecnologías desarrolladas para obtener hidrógeno descarbonizado destinado al sector energético, investigando tecnologías conocidas como la electrólisis llegando a comparar el funcionamiento de los tipos de electrólisis existentes y describir otras formas novedosas como las que componen la producción de hidrógeno biológico o bio-hidrógeno, llegando a analizar diversas investigaciones con el objetivo de exponer los resultados en los métodos fermentativos, el uso de microalgas y la celda de electrólisis microbiana, exponiendo los principales desafíos y analizando las características y el estado de investigación de estas formas de producción.

Abstract

The Growing concern about environmental problems and the depletion of fossil fuels has generated interest in the development of technologies that allow us to produce electricity without having to pollute the environment. Hydrogen has become the main candidate to replace fossil fuels in the last decades, having the possibility to be used as a primary fuel to be burned in combustion engines, or as an energy vector for the production of energy by means of fuel cells, becoming an attractive fuel due to its high energy density and that does not emit any type of pollution. Currently, hydrogen is not produced for energy purposes, but for industrial purposes, so the objective of this article is to learn about the predominant forms of hydrogen production, which use fossil fuels as raw materials, and to study the new technologies developed to obtain decarbonised hydrogen intended for the energy sector, investigating known technologies such as electrolysis, getting to compare the functioning of the existing types of electrolysis and describing other novel forms such as those that make up the production of biological hydrogen or bio-hydrogen, getting to analyse different research with the aim of presenting the results in fermentative methods, the use of microalgae and the microbial electrolysis cell, explaining the main challenges and analysing the characteristics and the research status into these forms of production.

Keywords: hydrogen production, green hydrogen, bio-hydrogen, water electrolysis, alternative energies, dark fermentation, photofermentation, biophotolysis, fossil fuels.

Palabras clave: producción de hidrógeno, hidrógeno verde, Biohidrógeno, electrólisis del agua, energías alternativas, fermentación oscura, fotofermentación, biofotólisis, combustibles fósiles.

¿Cómo citar?

Cuellar, Y.G., Bermúdez, J.R., Herrera, D.A. Hidrógeno verde: revisión del estado del arte de las tecnologías de generación para la descarbonización del sector energético. Ingeniería y Competitividad, 2024, 26(3) e-30114190

<https://doi.org/10.25100/iyv.26i3.14190>

Recibido: 26-05-24

Aceptado: 10-08-24

Correspondence:

yohangerardocper@ufps.edu.co

Este trabajo está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-No Comercial-CompartirIgual4.0.



Conflicto de intereses: ninguno declarado



¿Por qué se realizó?:

El manuscrito pretende abordar y explorar las diversas rutas y tecnologías de generación de hidrógeno que han evolucionado hasta el día de hoy. Su objetivo central es proporcionar una visión integral del estado actual y las tendencias en el desarrollo de tecnologías de producción de hidrógeno eficientes y limpias, especialmente en el contexto de la transición energética hacia fuentes más sostenibles. Este enfoque se justifica por la necesidad de encontrar alternativas energéticas que reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero, dado que la producción de energía actual, basada en combustibles fósiles, es un importante contribuyente a las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, el manuscrito busca examinar tanto las tecnologías establecidas como las emergentes, con un énfasis especial en la producción de hidrógeno verde, para ayudar a mitigar el cambio climático y avanzar hacia una matriz energética más limpia y sostenible.

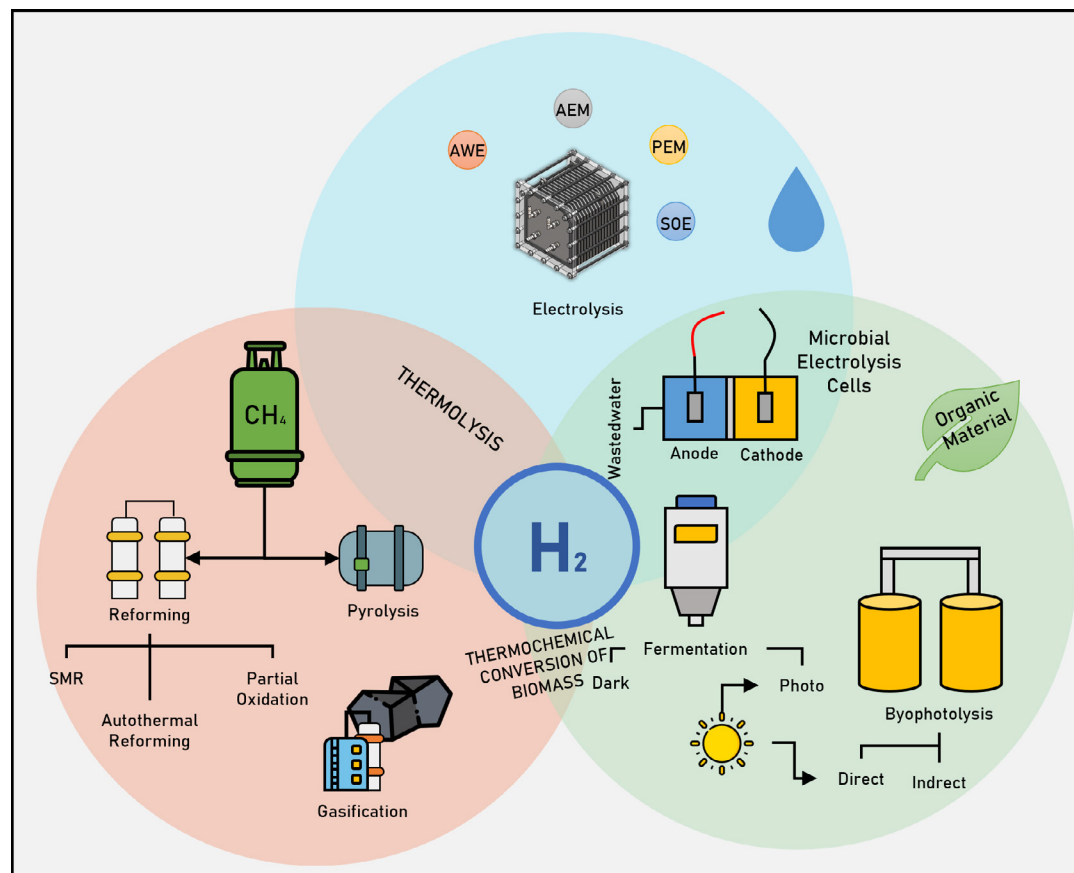
¿Cuáles fueron los resultados más relevantes?

Los resultados más relevantes indican que el hidrógeno se posiciona como una matriz energética con gran potencial para reemplazar a los combustibles fósiles. La investigación actual se centra en la electrólisis y la producción de biohidrógeno como los principales mecanismos para la obtención de hidrógeno sin contaminación ambiental. Se han identificado diferentes métodos en el campo del biohidrógeno, adaptados a diferentes microorganismos y materias primas. Entre los desafíos específicos se incluyen el diseño de reactores adecuados, la necesidad de sustratos ricos en glucosa y el control del crecimiento bacteriano para los procesos fermentativos, así como la exploración de soluciones de ingeniería genética para la biofotólisis.

¿Qué aportan estos resultados?

Estos resultados proporcionan una dirección clara para la investigación energética al identificar la electrólisis y la producción de biohidrógeno como tecnologías clave para la generación de hidrógeno limpio, lo que subraya la importancia de seguir desarrollando estas soluciones para reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Además, al analizar los desafíos técnicos en la producción de biohidrógeno, como el diseño de reactores y las limitaciones en la biofotólisis, proporcionan una base para centrar la investigación en la mejora de la eficiencia de estos procesos. También destacan la necesidad de desarrollar una infraestructura adecuada para el almacenamiento, transporte y distribución de hidrógeno, lo que es crucial para su integración en los sistemas energéticos existentes. En conjunto, estos hallazgos no solo impulsan el desarrollo de tecnologías más sostenibles, sino que también orientan la formulación de políticas energéticas que promuevan la transición a una economía del hidrógeno.

Graphical Abstract



Introducción

La demanda energética actual se satisface mayoritariamente mediante el uso de recursos como el gas natural, el carbón y el petróleo. Esta forma de producir energía es responsable de una cantidad considerable de propagación de gases de efecto invernadero (GEI), representando más del 66,667% de las emisiones globales, como lo informa la agencia de protección del medio ambiente de Estados Unidos (EPA) (1). Solo para el año 2021, la liberación de dióxido de carbono (CO_2) vinculada a la generación de energía registró un incremento del 6%, alcanzando un récord de 36.300 millones de toneladas (2, 3). Este aumento se fundamenta en gran medida al crecimiento de la población y a la explotación constante de combustibles fósiles, algo que ha traído como resultado un aumento del 68% en las concentraciones de CO_2 y carbono antropogénico en la atmósfera (4).

Por estas razones se han realizado esfuerzos para encontrar otras formas de generar energía que tenga cero emisiones de carbono. Un recurso energético que ha tenido cierta relevancia en las últimas décadas ha sido el hidrógeno. Su importancia está dada por la capacidad que tiene el elemento para almacenar energía en relación con su masa, la cual se estima alrededor de los 143MJ/kg (5-7). Esta densidad energética es la más alta entre los combustibles conocidos. Otro factor que toma importancia es la versatilidad que tiene este elemento para generar energía limpia, ya sea quemándose directamente (8) o produciéndola, empleando el uso de celdas de combustible (9). Este elemento se considera respetuoso con el medio ambiente al momento de generar energía. Sin embargo, su neutralidad con respecto al carbono se fundamenta en la forma en que se produzca el hidrógeno (10).

Durante muchos años, el hidrógeno ha tenido una participación crucial en el sector industrial, especialmente para sintetizar amoníaco y en la fabricación de fertilizantes (11), impulsando el desarrollo de tecnologías especializadas en su separación a partir de recursos fósiles. El desarrollo de estas tecnologías se lleva a cabo, gracias a que el hidrógeno no se encuentra aislado en la naturaleza (12). A través del tiempo, se han explorado distintos procedimientos para obtener hidrógeno aislado de estos compuestos, basados en el tipo de materia prima utilizada: recursos fósiles como petróleo, carbón y gas natural, o recursos renovables como agua y biomasa (13, 14).

En América Latina, ha surgido un gran interés por la producción y almacenamiento de hidrógeno a nivel global. Esto se debe, en parte, a que varios países de la región cuentan con un bajo costo de energía limpia, como resultado de la transición energética hacia una matriz energética menos contaminante, como es el caso de Brasil y Colombia, generando una proporción significativa de su energía a través de fuentes hidroeléctricas (15 - 17). Además, se ha observado un interés en construir plantas de producción de hidrógeno verde en la región; esta industria podría generar múltiples beneficios, incluyendo la creación de empleos, el aumento de la asequibilidad del servicio energético para sectores que aún no cuentan con él, la mitigación del cambio climático y la reducción de la pobreza (18). Entre los países de la región, Chile ha desarrollado un mayor énfasis, teniendo dos proyectos en desarrollo; países como Colombia se encuentran en estado de análisis para el desarrollo de una hoja de ruta y en Costa Rica se consolidó una alianza entre empresas públicas y privadas con el objetivo de generar oferta y demanda de este recurso (18-20). Esta investigación tiene como objetivo central abordar las diversas rutas de generación de hidrógeno que han evolucionado hasta la actualidad; por un lado, se revisarán las tecnologías consolidadas a nivel industrial para la producción de hidrógeno. Por otro lado, se explorarán las tecnologías emergentes que permiten generar hidrógeno de manera sostenible, sin producir contaminación ambiental, teniendo como énfasis principal comprender el funcionamiento de las tecnologías para producir hidrógeno verde. Para desarrollar este objetivo, se examinarán diferentes artículos de investigación que exponen resultados experimentales de las diversas alternativas tecnológicas de producción de

hidrógeno. De esta manera, el estudio busca proporcionar una visión integral sobre el estado actual y las tendencias en el desarrollo de tecnologías eficientes y limpias para la generación de hidrógeno, con el fin de contribuir a la transición energética hacia fuentes más sustentables.

Metodología

En esta sección detallaremos el proceso que llevamos a cabo para realizar el rastreo bibliográfico, crucial en la identificación de estudios relevantes para nuestro artículo. Las fuentes bibliográficas seleccionadas para la recopilación de datos son las siguientes: Scopus, Science Direct, Google Académico, Web of Science, Springer Link, Taylor & Francis. Estas plataformas facilitan enormemente el filtrado de los artículos de investigación, permitiéndonos limitar la búsqueda a artículos de revisión e investigación, así como por año. Desarrollamos ecuaciones de búsqueda empleando operadores booleanos (AND, OR, NOT), utilizando las siguientes palabras clave: "Hydrogen production", "Fuel cells", "Green hydrogen", "Technologies for hydrogen production", "Electrolyzers", "Electrolytic cells", "Biohydrogen", "Pyrolysis", "Natural gas", Gasification, "Autothermal reforming", Thermochemical.

El uso de estas ecuaciones nos permitió reducir significativamente el número de documentos recuperados, limitándolo a menos de 50 por ecuación de búsqueda. Esta estrategia agiliza el proceso de revisión y garantiza una selección más precisa de documentos relevantes. En cuanto a los criterios de inclusión, priorizamos documentos de los últimos 10 años y en idioma inglés. Inicialmente, incluimos un alto número de artículos de revisión para obtener una visión general de todas las tecnologías de producción. Posteriormente, enfocamos nuestra atención en investigaciones individuales de cada tecnología, con el objetivo de profundizar en aspectos operativos, eficiencia, ventajas y desventajas de cada una; este enfoque nos permitió obtener un conocimiento detallado y completo de cada tecnología considerada. De este modo, la estructura de la investigación se organizó en función de las diferentes tecnologías de producción de hidrógeno, como la electrólisis, la gasificación y la producción biológica, entre otras, permitiendo esto analizar de manera sistemática las diversas aproximaciones y enfoques empleados en cada área, así como identificar tendencias emergentes y áreas de investigación prometedoras.

Tecnologías de generación de hidrógeno

A través de los años, la demanda mundial de hidrógeno ha experimentado un notable incremento, impulsando un aumento significativo en su producción. Según datos recientes, la producción global de hidrógeno ascendió a 90 millones de toneladas (Mt) en el año 2020 (21), mientras que para el año 2021, esta cifra se elevó a 94 millones de toneladas (22). Además, en el transcurso del año 2022, la producción total de hidrógeno registró un aumento adicional de 11,1 millones de toneladas anuales (23). Es importante destacar que la mayor parte de esta creciente productividad del hidrógeno sigue dependiendo exclusivamente de los recursos fósiles, resultando en la liberación de aproximadamente 900 mt de CO₂ (22, 24).

En general, estas tecnologías se clasifican mediante un sistema de codificación de colores, con el propósito de facilitar la distinción y descripción de los diversos procesos de producción (25, 26). En la figura 1 se encuentra la codificación que recibe el hidrógeno por colores, con sus respectivos procesos de producción y las materias primas más utilizadas en la generación de hidrógeno. Estos se clasifican en diferentes categorías según los procesos de producción empleados, lo que da lugar a una amplia gama de colores que reflejan su origen e impacto ambiental, los cuales son: el hidrógeno gris, el hidrógeno azul y el hidrógeno verde. Estas son las principales categorías, cada una con sus particularidades (27, 28).

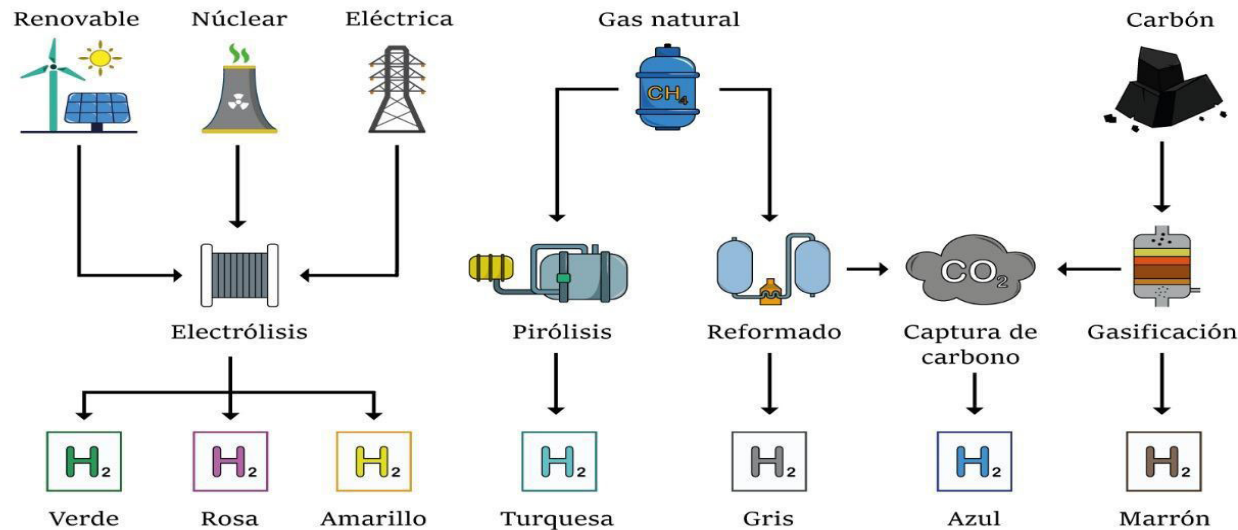


Figura 2. Categorización del hidrógeno según los métodos de obtención. **Fuente:** Autores.

En primer lugar, el hidrógeno gris se obtiene mediante la reformación de hidrocarburos, especialmente metano, a través de procesos termoquímicos (29), siendo el método más económico, pero con altas emisiones de CO_2 ($9,5 \text{ KgCO}_2/\text{KgH}_2$). El hidrógeno azul incorpora tecnologías de captura y almacenamiento de carbono para mitigar las emisiones, reduciéndolas entre valores de 1 y $2 \text{ KgCO}_2/\text{KgH}_2$, aunque aún depende de recursos no renovables (30). En contraste, el hidrógeno verde se produce mediante procesos electroquímicos, como la disociación electrolítica del agua, utilizando electricidad de fuentes sostenibles como eólica, solar o hidroeléctrica, con bajas emisiones (31, 32) ($8,2 \text{ KgCO}_2/\text{KgH}_2$ en Colombia) (33). Esta clasificación por colores permite identificar el origen y la huella ambiental de cada tipo de hidrógeno, fomentando decisiones informadas y un enfoque más sostenible en la gestión energética (34, 35).

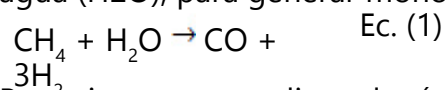
Producción a partir de combustibles fósiles

Hasta la fecha, la producción de hidrógeno ha estado mayormente vinculada al empleo de combustibles fósiles como materia prima principal, los cuales se componen especialmente de hidrocarburos caracterizados por contener grandes cantidades de hidrógeno y carbono en su estructura molecular. El estado físico a temperatura ambiente de estos combustibles (carbón, petróleo y gas natural) varía según la cantidad de carbono presente (36). Los procedimientos para obtener hidrógeno se centran en la descomposición de los enlaces existentes entre el hidrógeno y el carbono de estos hidrocarburos, representando uno de los métodos más ampliamente empleados en la actualidad para la producción de este elemento a partir de combustibles fósiles (37).

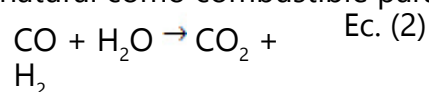
Reformado de hidrocarburos

En la actualidad, la ruta tecnológica predominante a escala global para la generación de hidrógeno es el reformado de hidrocarburos, principalmente metano, representando cerca del 48% de la producción total (38). En este ámbito, se han consolidado tres enfoques distintos: el reformado con vapor de agua (39), la oxidación parcial y el reformado autotérmico (40 - 41).

En primer lugar, el reformado con vapor de agua (SMR) consiste en hacer reaccionar metano con vapor a temperaturas dentro de rangos de 700 y 1000°C y presiones moderadas entre 3 y 25 bares (40-42), donde esta reacción tiene lugar en presencia de un catalizador metálico compuesto principalmente de níquel. La reacción endotérmica se presenta en la ecuación 1, separando y recombinando las moléculas de metano (CH₄) y agua (H₂O), para generar monóxido de carbono e hidrógeno (43).

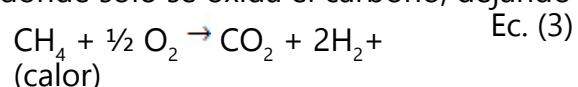


Posteriormente, mediante la técnica de desplazamiento gas-agua (water gas shift), se transforma el CO en CO₂ y se libera más hidrógeno, como se ve en la ecuación 2 (44). Esta reacción se considera exotérmica porque posee una reacción de entalpía estándar de -41,17 kJ/mol. Sin embargo, esta liberación de calor no es adecuada para mantener la temperatura necesaria en la reacción de reformado, por lo que se utiliza parte del gas natural como combustible para suplir la demanda de temperatura.



Después, se busca purificar el hidrógeno, separando el CO₂ y otros gases contaminantes, obteniendo finalmente hidrógeno de alta pureza (44). Aunque este proceso se considera la opción más económica, el hidrógeno que se produce se cataloga como "hidrógeno gris". Esto es por sus elevadas emisiones directas de CO₂ llegando a producir 9,5 KgCO₂/KgH₂ (37,39). Es viable implementar sistemas de captura y almacenamiento de carbono (CCS) que permitan la obtención económica y de bajas emisiones de hidrógeno a corto plazo, denominado "hidrógeno azul" (45).

Otro proceso que se utiliza en el reformado de hidrocarburos es la oxidación parcial. Este proceso consiste en la oxidación incompleta del hidrocarburo, oxidando el carbono y dejando libre al hidrógeno. Como se puede ver en la ecuación 3, el proceso consiste en inyectar una corriente de aire u oxígeno en un reactor que contiene al hidrocarburo (37), donde solo se oxida el carbono, dejando CO y liberando el H₂.



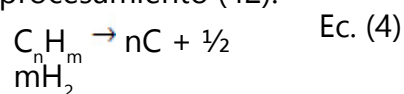
El CO producido se somete al desplazamiento de agua y gas para obtener hidrógeno adicional, como sucede en la ecuación 2 (46); además, la velocidad de reacción supera a la de la reforma de vapor, y esto permite utilizar un reactor de dimensiones más reducidas (47). Un aspecto destacable es su capacidad para manejar la presencia de azufre en la materia prima sin necesidad de catalizadores, aunque en casos de baja concentración de azufre en la materia prima, es posible emplear catalizadores para reducir la temperatura de reacción y facilitar el control térmico del proceso (44).

Por último, se presenta al reformado autotérmico. Este proceso combina a la oxidación parcial y al SMR en un solo reactor, buscando optimizar el equilibrio térmico, aprovechando la energía generada por la oxidación parcial para impulsar las reacciones del SMR (48). En este proceso, se introduce oxígeno y vapor de agua en el reactor simultáneamente, lo que permite un control preciso de la temperatura y ajusta la proporción de aire a combustible. La eficiencia energética de este proceso es relativamente alta, ya que demanda menos energía que el reformado con vapor, pero con un rendimiento menor que el SMR, aunque superior al de la oxidación parcial (42, 49, 50).

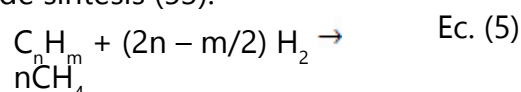
Pirólisis de hidrocarburos

El proceso de pirólisis es una reacción termoquímica que involucra la descomposición térmica de las moléculas de hidrocarburos mediante la aplicación de calor en un

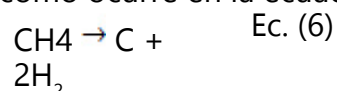
entorno carente de oxígeno, obteniendo hidrógeno y carbono, como se expresa en la ecuación 4 (45, 51). Los productos derivados de esta transformación son afectados por diversos elementos, como el tipo de combustible utilizado, las condiciones de presión y temperatura durante la operación, así como el tiempo de material que pasa en la unidad de procesamiento (42).



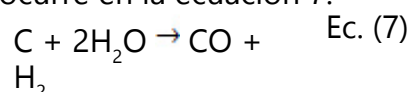
Durante este procedimiento, las moléculas de hidrocarburos, tales como el metano (CH_4), el etano (C_2H_6), el propano (C_3H_8), entre otros, que se encuentran en combustibles fósiles, son sometidas a elevadas temperaturas, generalmente en el rango de 700 a 900°C (52). Como la separación termoquímica se produce a partir de fracciones residuales pesadas con puntos de ebullición superiores a 350 °C, tiene sentido que la producción de hidrógeno se realice en dos etapas, la hidrogasificación descrita en la ecuación 5, método que consiste en someter al metano con gas rico en hidrógeno y vapor de agua para convertirlo en gas de síntesis (53).



Esto conduce a la ruptura de los enlaces químicos que conectan átomos de carbono e hidrógeno, generando como resultado hidrógeno y carbono sólido en forma de coque como ocurre en la ecuación 6 (50).



El hidrógeno producido se puede separar y purificar, muy parecido a las últimas dos fases del SMR. Por otro lado, el carbono sólido o coque que se forma puede gasificarse con vapor para producir más hidrógeno, haciendo uso de la reacción de desplazamiento, como ocurre en la ecuación 7.



El proceso de pirólisis se destaca por su capacidad para prevenir la generación de dióxido de carbono (CO_2), lo que la convierte en una tecnología de bajas emisiones para la producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles (49). Aunque este proceso requiere de temperaturas más elevadas en contraste con SMR, cuenta con la ventaja de prescindir catalizadores costosos (52).

Gasificación del carbón

La gasificación consiste en convertir un material sólido en gas combustible. Esto lo hace mediante un proceso termoquímico que permite obtener gas de síntesis a partir de materiales como la biomasa o el carbón (54). El gas de síntesis está conformado por monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H_2), dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4). Este gas se puede usar como combustible por sí solo, o se puede separar para producir distintos productos químicos (51).

La gasificación se lleva a cabo en un reactor especial, conocido como gasificador, en el que se calientan los materiales de alimentación a altas temperaturas, oscilando entre los 700 y 1500°C, generalmente en un entorno con deficiencia de oxígeno, limitándolo en un 10 y 50% del estequiométrico (55). Este proceso permite que la materia prima se descomponga térmicamente y se convierta en gas, en lugar de quemarse completamente como en una combustión convencional (56, 57).

La gasificación se presenta como una alternativa a la convencional combustión de carbón, ofreciendo notables ventajas como una mayor eficiencia para la generación de energía y una disminución significativa de los GEI (58). Aunque se debe destacar que este proceso aún involucra costos considerables y demanda equipamiento especializado, lo que restringe su aplicación a gran escala (50).

Producción a partir de recursos renovables

La producción convencional de hidrógeno a partir de combustibles fósiles, aunque es eficiente, genera altas emisiones de CO₂ (59). Sin embargo, se han desarrollado tecnologías menos contaminantes que aprovechan recursos energéticos renovables como la luz solar, la electricidad y los procesos bioquímicos (60). Estas vías de producción, que incluyen la electrólisis del agua, la fotólisis con energía solar directa y la conversión de biomasa mediante procesos biológicos y termoquímicos, permiten obtener hidrógeno limpio utilizando materias primas como agua y biomasa (61, 62). Este enfoque no solo reduce las emisiones contaminantes, sino que también contribuye a la transición hacia una matriz energética más sostenible y respetuosa con el medio ambiente (63).

División del agua

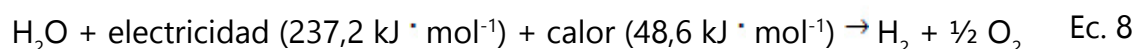
La división del agua emerge como una vía de producción de suma importancia, ya que se ha consolidado en la producción de hidrógeno. Esta forma de producción se basa en descomponer las moléculas de agua a través de procesos especializados de división del agua, tales como la electrólisis, la termólisis y la fotólisis (62, 63).

a. Termólisis

Linares y Moratilla definen a la termólisis como “la extracción del hidrógeno de la molécula que lo alberga mediante la aplicación de calor. Se habla de termólisis cuando el calor procede de una fuente externa” [11, p. 39]. Estos autores llaman termólisis “cuando el calor procede de una fuente externa”. Para que ocurra la división del agua, es necesario llevar la energía libre de Gibbs (ΔG) a cero. Esto es necesario para que la descomposición del agua se realice. No obstante, la principal limitación de esta forma de producir hidrógeno radica en alcanzar el nivel requerido en la energía libre de Gibbs. Para esto son necesarias temperaturas alrededor de 2500K (64). Las propiedades termodinámicas de las reacciones de descomposición del agua en condiciones estándar dificultan la realización eficiente de síntesis térmica directa a temperaturas más bajas (65).

b. Electrólisis.

La electrólisis se basa en la división de un compuesto químico en sus componentes más básicos, mediante el uso de la corriente eléctrica. La reacción básica de la electrólisis se encuentra en la ecuación 7. Lladó & Jubert (66) explican cómo la combinación de la energía libre de Gibbs y la energía térmica satisface la demanda energética teórica, siendo esta la responsable de la disociación de la molécula de agua. Asimismo, el voltaje teórico que se debe aplicar para que ocurra la división del agua, el cual es de 1,23 V, como lo explican Fábregas & Huertas (64), este valor se obtiene vinculando la energía libre con el concepto de trabajo útil, aplicando la primera ley de la termodinámica (64, 66, 67).



Cabe resaltar que esta tecnología se ha desarrollado y utilizado a escala comercial (10, 68). Su desarrollo constante permitió introducir cuatro tipos de electrólisis, las cuales se diferencian por sus parámetros operativos y materiales de construcción, donde (i) electrólisis de agua alcalina, (ii) electrólisis de agua de membrana de intercambio aniónico (AEM), (iii) electrólisis del agua de membrana de intercambio protónico (PEM) y (iv) electrólisis de agua de óxido de sodio; donde los principios de funcionamiento son los

mismos para cada uno de los casos (62). En la tabla 1 se enuncian las diferentes tecnologías existentes, sus condiciones de operación y las ventajas y desventajas que presentan.

Tabla 1. Funcionamiento de las distintas tecnologías de electrólisis

Tipo de electrólisis	Electrolito	Temperatura (°C)	Voltaje (V)	Densidad de corriente (A/m ²)	Catalizador	Eficiencia	Ref.
Alcalina (AWE)	KOH, NaOH	60 -80	1,4 - 3	0,2 - 0,8	Níquel, hierro y cobalto.	50% - 71%	(69-71)
Intercambio aniónico (AEM)	Soporte polimérico DVB con KOH/NaOH 1 M	20 -80	1,4 - 2	0,2 - 2	Metales nobles como el platino	57% - 59%	(62)
Intercambio protónico (PEM)	Electrolito polimérico sólido (PFSA)	60 -80	1,4 - 2,5	1,4 - 2,5	Metales nobles como el platino	50% - 83%	(72-74)
Óxido sólido (SOE)	Circonio estabilizado con itria (YSZ)	800 - 1000	1 - 1,5	1 - 1,5	Metales nobles	89% (Laboratorio)	(75, 76)

En la actualidad, las investigaciones sobre la electrólisis del agua se han enfocado en aumentar la eficiencia del proceso. Esta eficiencia se ve desfavorecida por la cinética deficiente debido a la transferencia de cuatro electrones en la reacción de evolución de oxígeno (OER), la cual es más lenta que la reacción de evolución del hidrógeno (HER), que solo necesita dos electrones (77). Song et al. Proporciona una revisión exhaustiva de los avances en la síntesis, mecanismos catalíticos y aplicaciones de catalizadores de oxígeno por evolución (OER), resaltando la necesidad de catalizadores eficientes y de bajo costo. Se exploran varios tipos de catalizadores prometedores, incluyendo hidróxidos y óxidos de metales de transición, fosfatos de metales de transición, compuestos de metales complejos y materiales metal-orgánicos (MOF), mientras se destaca la importancia de comprender y optimizar la reactividad, estabilidad y escalabilidad de estos catalizadores mediante diversas técnicas de caracterización. La investigación continua en el desarrollo de electrocatalizadores económicos y eficientes, algo esencial para lograr un proceso de electrólisis de agua asequible y sostenible. La cual se utilizará para la producción a gran escala de hidrógeno y para la conversión eficiente de energía solar en combustibles químicos (78).

Por estas razones, el campo de la electrólisis se ha mantenido en el desarrollo de materiales electrocatalíticos de bajo costo, los cuales permiten aumentar la eficiencia energética, seguridad, durabilidad, operatividad, portabilidad y los altos costos de instalación y operación (67). Ángeles-Olvera et al. (79) realizaron una revisión sobre electrocatalizadores a base de níquel por ser un metal abundante en la tierra, donde señalan que es clave elucidar los mecanismos de reacción y el papel de los heteroátomos, defectos, dopantes y nanoestructuras. Además, es importante diseñar técnicas de síntesis y caracterización accesibles a nivel industrial.

El artículo de Chen et al. (80) amplía esta perspectiva al examinar diversas fuentes de energía renovable, como urea, hidracina y biomasa, para la producción sostenible de hidrógeno a través de la electrólisis del agua. Se exploran las ventajas de las reacciones de oxidación de la urea en medio alcalino, el uso favorable de la hidracina como combustible ecológico y económico, y la posibilidad de aprovechar la biomasa con estrategias de pretratamiento. En conjunto, el artículo destaca la importancia de diversificar las fuentes de energía renovable, ofreciendo oportunidades para tecnologías más eficientes y económicas que reduzcan la dependencia de combustibles fósiles y mitiguen el impacto ambiental.

Por otro lado, el artículo, escrito por Liu (78), aborda la necesidad de desarrollar electrocatalizadores asequibles para la producción de hidrógeno a través de la electrólisis del agua de intercambio protónico (PEMWE), presentando alternativas no basadas en metales del grupo del platino (PGM), platino, paladio, rodio, rutenio, iridio y oro, buscando sustituirlos por compuestos a base de carbono y nitruro de boro. Esta investigación destaca la importancia de abordar desafíos en el diseño de catalizadores no basados en PGM, proponiendo soluciones como la deposición de capas atómicas y la técnica de moldeo por inyección. Además, plantea que el análisis económico sugiere eficiencia en costos a mediano y largo plazo con la implementación de estos catalizadores.

De la misma forma, Ángeles-Olvera et al. (79) aportan una revisión detallada sobre el uso de catalizadores de níquel para la electrólisis del agua, resaltando la importancia de desarrollar electrocatalizadores sostenibles y asequibles. Se discuten tipos específicos de catalizadores de níquel, como nanotubos, aerosoles, aleaciones y nanopartículas, que han demostrado eficiencia y estabilidad. El artículo enfatiza la necesidad de determinar la actividad catalítica bajo condiciones estándar para comparar y evaluar la eficiencia de estos materiales.

Producción con biomasa

La biomasa ha llamado mucho la atención en la producción de hidrógeno, porque es una materia prima que se puede obtener a partir de recursos biológicos generándose de manera natural; al ser así, la biomasa se convierte en un recurso renovable que puede producirse de manera sostenible (81). Un aspecto crucial es la posibilidad de emplear procesos termoquímicos para extraer el hidrógeno de los combustibles fósiles; sin embargo, utilizar biomasa presenta la ventaja de generar un impacto ambiental significativamente menor (61). Asimismo, la producción de hidrógeno puede llevarse a cabo mediante procesos biológicos, los cuales ofrecen diversos beneficios. No obstante, es esencial optimizar estos procesos y mejorar la eficiencia energética para maximizar su potencial (82).

A diferencia de los métodos previamente descritos, los enfoques biológicos permiten aprovechar diversos tipos de residuos orgánicos, gracias a la actividad de distintos grupos de microorganismos. En la figura 2 se encuentran todos los procesos de producción que se llevan a cabo para la creación de hidrógeno por medio de microorganismos; esta forma de producción posibilita la disminución de las emisiones de CO₂, además de una eficiente eliminación de una gran cantidad de desechos y biomasa residual (82).

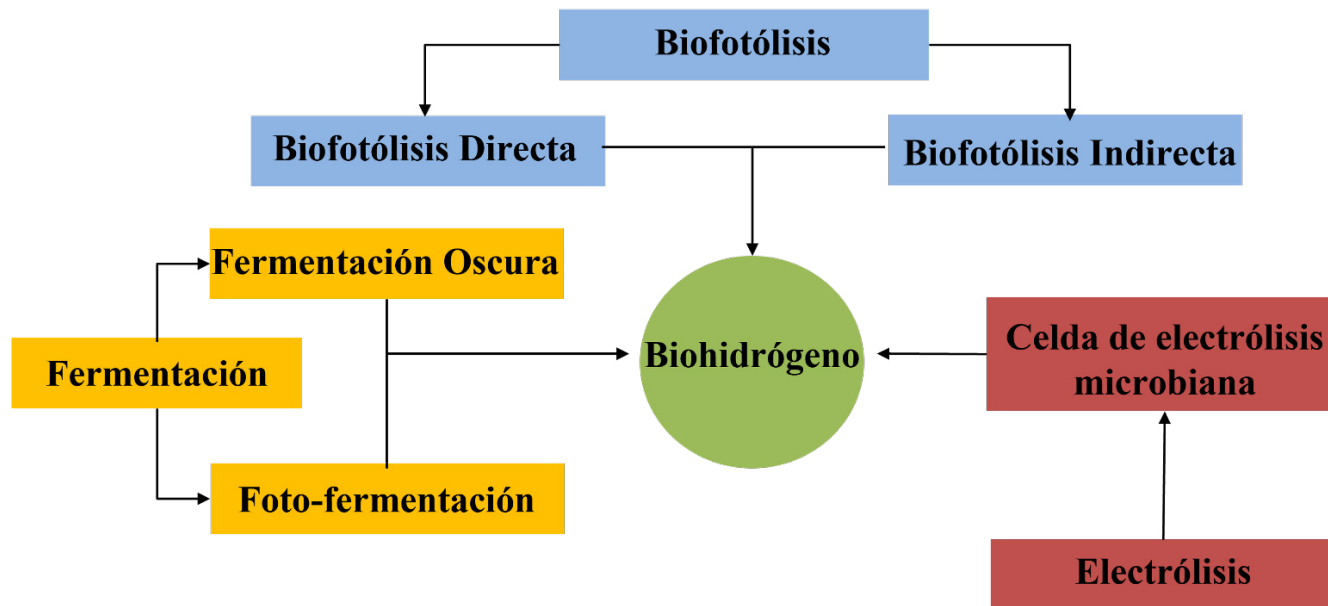


Figura 2. Diversos procesos de producción de hidrógeno biológico. **Fuente:** (6)

c. Fermentación

En general, los procesos fermentativos utilizan microorganismos para producir alcoholes, acetona, H_2 y CO_2 , a partir de sustratos orgánicos. Dependiendo del tipo de microorganismo, se da paso al tipo de fermentación, ya que existen grupos de bacterias que realizan la fermentación en ausencia de la luz. Esta variedad de bacterias da paso a dos tipos de fermentación, la fermentación oscura (DF) y la fotofermentación. En la tabla 2, se encuentran investigaciones experimentales sobre la producción de hidrógeno mediante estos procesos fermentativos (83).

Tabla 2. Investigaciones experimentales en la producción de hidrógeno por medio de procesos fermentativos con respecto a diferentes sustratos, pH y microorganismos

Microorganismo	Proceso	Sustrato	Concentración sustrato	pH	Producción	Ref.
Cultivos mixtos sacarolíticos	Fermentación oscura	Agua residual de destilería (DWW)	40g/L	6,5	0,8-1,6 L H ₂ /L	(84)
Rhodobacter sphaeroides B-3059		Agua residual de destilería (DWW)	40g/L	7	17,6 L H ₂ /L	
Rhodospirillum rubrum , Rhodobacter capsulatus y Rhodopseudomonas palustris		Almidón de papa	No especifica	6 - 7 - 8	45mL/L*h	(85)
Bacteria fotosintética HAU-M1		Alfalfa	31,23g/L	6,95	12,5mL/h	(86)
Rhodobacter sphaeroides 158 DSM		Aguas residuales de cervecería pretratadas con cáscara de plátano	50% de aguas residuales tratadas y 50% del medio estándar	No especifica	408,33 ml/h	(87)
Cultivos mixtos de bacterias	Fermentación oscura	Residuos de alimentos	10g/L	7 ± 3	74,91ml/g	(88)
Cultivos mixtos	Fermentación oscura	Pulpa de remolacha azucarera hidrolizada	No especifica	5,5	36dm ³ /Kg	(89)
Cepa bacteriana TERI S7	Fermentación oscura	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Xilosa ▪ Glucosa ▪ Sacarosa ▪ Solución de jarabe de maíz ▪ Almidón soluble 	10g/L	7	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 1899 ± 15 ml/L ▪ 1725 ± 37 ml/L ▪ 1651 ± 43 ml/L ▪ 1581 ± 63 ml/L ▪ 1416 ± 41 ml/L 	(90)
Cultivo mixto obtenido de una planta de tratamiento de aguas	Fermentación oscura	Residuo de trigo hidrolizado	15g/L	5,0 - 6,0	No especifica	(91)

En primer lugar, la fermentación oscura (DF) realiza la descomposición de sustratos a base de biomasa o aguas residuales provenientes de procesos industriales, realizando la descomposición a través de grupos de bacterias anaerobias en un ambiente libre de luz, las cuales utilizan azúcares como fuente energética; sin embargo, esta forma de producción presenta varios desafíos. Ren et al. (92) explica que los principales retos están en la construcción del biorreactor, la selección del sustrato rico en glucosa y la inhibición del sustrato. También es necesario controlar la tasa de crecimiento de las bacterias, como lo explica Wheelock Gutiérrez (49), ya que una baja producción se relaciona con una alta proporción de ácidos y alcoholes de cadena corta, causando la reducción del pH y afectando la actividad del microorganismo que sintetiza al hidrógeno.

Por otra parte, la fotofermentación emplea bacterias fotosintéticas que utilizan la energía lumínica como fuente de obtención de electrones en condiciones de carencia de nitrógeno y oxígeno. En este proceso, dichas bacterias toman el carbono y los electrones necesarios

de la materia orgánica presente en el sustrato (49); es necesario un medio anaerobio, porque la formación de H_2 se debe a la enzima nitrogenasa, fijando el nitrógeno y liberando hidrógeno en el proceso; sin embargo, la nitrogenasa se inhibe en presencia del oxígeno (93). La fotofermentación presenta diversos desafíos; entre ellos están el diseño del biorreactor, la disponibilidad de la luz, el controlar variables como la concentración del sustrato, el pH del biorreactor, la temperatura y la penetración de la luz; todos estos factores hacen de la fotofermentación un proceso complejo de operar con altos costos de producción de hidrógeno (6, 61, 81, 94).

d. Biofotólisis

La biofotólisis es un proceso biológico que implica el uso de luz y organismos como las bacterias fotosintéticas, microalgas y cianobacterias, usando la fotosíntesis natural de estas plantas para realizar la descomposición de la molécula del agua en hidrógeno y oxígeno por la acción de dos enzimas que son claves en la biofotólisis. Estas enzimas son la hidrogenasa y la nitrogenasa (82, 93, 95). Estas son de mucha importancia, ya que, por un lado, la hidrogenasa se encarga de la producción de hidrógeno a partir del agua, mientras que la nitrogenasa se encarga de facilitar la fijación del nitrógeno atmosférico, lo que puede mejorar el rendimiento del proceso al proporcionar nutrientes esenciales para los microorganismos. Sin embargo, estas enzimas actúan de forma diferente para la biofotólisis directa y la indirecta (81, 96, 97).

En cuanto a la función de las enzimas, Nagarajan et al. (98), en su artículo explican que “en la biofotólisis directa ocurre cuando los electrones fotosintéticos derivados de la división del agua se transfieren a través de PS II, PS I y ferredoxina a la hidrogenasa en condiciones anaeróbicas”. En cuanto a la biofotólisis indirecta, Nagarajan et al. afirman que se requiere una fuente externa de electrones necesarios para la acción de la hidrogenasa y esto se obtiene a partir del “metabolismo fermentativo de las reservas de carbohidratos almacenados, algo que ocurre en condiciones de oscuridad” (98).

Por otro lado, Kosourov et al. (99) explica que la hidrogenasa está involucrada en la reducción de electrones a hidrógeno, aprovechando la energía generada por la fotosíntesis y el flujo de electrones, haciendo uso de la producción de la hidrogenasa para convertir los protones en hidrógeno; para la biofotólisis indirecta, Kosourov et al. explican que la enzima nitrogenasa desempeña un papel crucial al proporcionar agentes reductores derivados de la fijación de nitrógeno, que pueden ser utilizados como sustratos en la generación de hidrógeno.

A pesar de las investigaciones que se han desarrollado para comprender el funcionamiento de este proceso, también se han llegado a desarrollar diversas investigaciones enfocadas en la optimización del proceso de biofotólisis. En la tabla 3 se encuentran algunos estudios. Unos concentran sus esfuerzos en el diseño de fotobiorreactores, mientras que los otros en el área de la genética celular y la experimentación con diferentes tipos de microorganismos.

Tabla 3. Investigaciones en diferentes áreas de la biofotólisis

Autores	Reseña del documento	Referencia
Schumann et al.	Se enfocan en el uso de hidrogenasas para catalizar la producción de hidrógeno. Hace énfasis a las hidrogenasas como catalizadores superiores, debido a sus tasas catalíticas más altas y una utilización de energía más eficiente.	(95)
Kosourov et al.	Presenta avances en la comprensión del metabolismo del hidrógeno y su impacto en la bioenergética celular, abriendo posibilidades para el desarrollo de fábricas celulares productoras de hidrógeno con un rendimiento mejorado. También se explora el uso de la hidrogenasa sintetizada.	(99)
Kamshybayeva et al.	Estudia la sensibilidad de las enzimas al oxígeno y la competencia de electrones en diferentes vías metabólicas, enfocándose en las limitaciones de la producción de hidrógeno a nivel industrial. Utilizando avances en ingeniería genética y biotecnología, se exploran soluciones para potenciar la producción de hidrógeno en cianobacterias.	(100)
Kossalbayev et al.	Describe en detalle las características de diseño de los fotobiorreactores y las condiciones necesarias para cultivar cianobacterias de forma óptima.	(101)
Bozieva et al.	Investigación sobre la posibilidad de producción de hidrógeno por medio de la biofotólisis en diferentes especies de cianobacterias. Se estudian las cepas <i>Cyanobacterium</i> sp., <i>Dolichospermum</i> sp. y <i>Sodalinema gerasimenkoe</i> IPPAS B-353, demostrando que las más eficientes son <i>Dolichospermum</i> sp. bajo condiciones de anaerobiosis luminosas y <i>Sodalinema gerasimenkoe</i> IPPAS B-353 en la oscuridad.	(102)

e. Celda de electrólisis microbiana

La celda de electrólisis microbiana (MEC) se relaciona con la electrólisis tradicional ya descrita en secciones anteriores, con la diferencia de que se combina la electroquímica con el metabolismo bacteriano (103). El material orgánico presente en la cámara anódica se degrada por la acción de microorganismos, particularmente de una especie exoelectrogénica. Con la ayuda de una pequeña cantidad de electricidad, se degrada el material orgánico produciendo electrones, CO_2 y protones ($+\text{H}$) (104). Donde los protones pasan a través de la membrana de intercambio de protones (PEM) hacia la cámara catódica por la acción de "microorganismos metanogénicos hidrogenotróficos y una pequeña diferencia de potencial" (105), se realiza la reacción de reducción emparejando protones ($+\text{H}$) con electrones dando lugar a la producción de hidrógeno.

El interés sobre esta forma de producción de hidrógeno ha generado diversos diseños para la configuración de reactores MCE. Murugaiyan et al. (106) realizaron una investigación enfocada al estudio de las diferentes configuraciones en los reactores junto con los materiales requeridos para su construcción. Jensen et al. (103) realizaron una revisión completa enfocada en la producción de hidrógeno utilizando (MEC), donde un punto importante de este documento son las configuraciones y el diseño de los reactores, dando importancia a los materiales de ánodo y cátodo. En la tabla 4 se encuentran diferentes investigaciones haciendo uso de la electrólisis microbiana, probando diferentes tipos de configuraciones, sustratos, membranas, etc.

Tabla 4. Tasa de producción de hidrógeno con respecto a diversos sustratos, materiales y tipo de reactor.

Tipo de reactor	Ánodo	Cátodo	Membrana	Sustrato	Inóculo	Tasa de producción	Ref.
De doble cámara	Nanocompuestos de óxido de metal y grafeno	Espuma de níquel (NF)	Nafion	Agua residual de la industria del azúcar (SWW)	No específica	4,38 ± 0,11 mmol/L/D	(107)
Cámara única	Tela de carbono	Fosforo de molibdeno (MoP)	MEC sin membrana	Acetato y glucosa	No específica	39,8 ± 1,9 L/L/D	(108)
Doble cámara	fieltro de grafito de 5 mm de espesor.	Electrodos de malla de acero inoxidable	Membrana de intercambio catiónico	Purín de cerdo	digestato de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales local	0,2 LH ² /L ^{-día}	(109)
Doble cámara	Biocarbón	Grafito	Membrana de intercambio catiónico (CMI-7000)	Agua sintética	Hoeflea sp. y Aquiflexum sp.	0,89 ± 0,10 m ³ / día*m ³	(110)
Cámara única	fieltro de carbono	Cátodo de papel carbón Nano-Mg(O) ₂ Gr	No específica	Tampón fosfato	Solución de bacterias de MFC	0,63 ± 0,11 m ³ / día*m ³	(111)

Conclusiones

El desarrollo y utilización de la energía del hidrógeno se ha convertido en una dirección relevante en el campo de la investigación energética moderna, al posicionarse como una matriz energética con gran potencial para reemplazar los combustibles fósiles en el futuro. Las investigaciones actuales se enfocan en avanzar en diversos mecanismos para la producción de hidrógeno sin contaminación ambiental.

Por un lado, se encuentra a la vanguardia la electrólisis, una forma de producción que parece ser la principal fuente de hidrógeno limpio al implementarla con fuentes de energía renovables. Por otro lado, se encuentran los diversos procesos que engloban la producción de biohidrógeno. Esta última se destaca por el uso de recursos renovables como el agua y la biomasa, trazando un camino hacia una producción de hidrógeno más limpia y sostenible. Dentro del campo del biohidrógeno, se han encontrado diferentes métodos que se ajustan a los microorganismos y al tipo de materia prima utilizada. Con el desarrollo de esta investigación, podemos analizar cada uno de estos diferentes métodos y cuáles son los principales desafíos que se deben superar para alcanzar una eficiencia competitiva frente a los procesos de producción industriales tradicionales. En cuanto a los procesos fermentativos, los retos a superar se enfocan en el diseño y construcción de reactores adecuados, la necesidad de un sustrato rico en glucosa y el control de la tasa de crecimiento bacteriano. Por su parte, en la biofotólisis, se deben explorar soluciones en conjunto con la ingeniería genética para superar las limitaciones de la producción a nivel industrial.

Adicionalmente, es crucial continuar investigando y desarrollando tecnologías más eficientes y escalables para la producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables, con el fin de reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar el impacto ambiental. Además, se deben abordar desafíos como el almacenamiento, transporte y distribución del hidrógeno, así como la integración de estas tecnologías en los sistemas energéticos existentes para una transición energética sostenible.

Referencias

1. Sources of Greenhouse Gas Emissions [Internet]. [citado 12 de marzo de 2023]. Disponible en: <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions>
2. IEA. Greenhouse Gas Emissions from Energy Data Explorer – Data Tools - IEA [Internet]. 2021 [citado 27 de enero de 2023]. Disponible en: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/greenhouse-gas-emissions-from-energy-data-explorer>
3. IEA. Global CO2 emissions rebounded to their highest level in history in 2021 - News - IEA [Internet]. 2022 [citado 27 de enero de 2023]. Disponible en: <https://www.iea.org/news/global-co2-emissions-rebounded-to-their-highest-level-in-history-in-2021>
4. Shiva Kumar S, Lim H. An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. Energy Reports [Internet]. 1 de noviembre de 2022 [citado 28 de diciembre de 2022];8:13793–813. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352484722020625>
5. Tashie-Lewis BC, Nnabuife SG. Hydrogen Production, Distribution, Storage and Power Conversion in a Hydrogen Economy - A Technology Review. Chemical Engineering Journal Advances [Internet]. 15 de noviembre de 2021 [citado 5 de enero de 2023];8:100172. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2666821121000880>
6. Ferraren-De Cagalitan DDT, Abundo MLS. A review of biohydrogen production technology for application towards hydrogen fuel cells. Renewable and Sustainable Energy Reviews [Internet]. 1 de noviembre de 2021 [citado 5 de enero de 2023];151:111413. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032121006973>
7. Xu X, Zhou Q, Yu D. The future of hydrogen energy: Bio-hydrogen production technology. Int J Hydrogen Energy [Internet]. 15 de septiembre de 2022 [citado 4 de enero de 2023];47(79):33677–98. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319922033961>
8. Menaca R, Bedoya-Caro ID. Una revisión del uso del hidrógeno en motores de encendido por compresión (diésel) y un análisis de su posible uso en motores duales en Colombia. Revista UIS Ingenierías [Internet]. 21 de julio de 2022 [citado 12 de mayo de 2023];21(3):33–54. Disponible en: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/13211>
9. Pramuanjaroenkij A, Kakaç S. The fuel cell electric vehicles: The highlight review. Int J Hydrogen Energy [Internet]. 24 de diciembre de 2022 [citado 8 de enero de 2023]; Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319922053368>
10. Gao FY, Yu PC, Gao MR. Seawater electrolysis technologies for green hydrogen production: challenges and opportunities. Curr Opin Chem Eng [Internet]. 1 de junio de 2022 [citado 4 de enero de 2023];36:100827. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211339822000375>
11. Abdin Z, Zafaranloo A, Rafiee A, Mérida W, Lipiński W, Khalilpour KR. Hydrogen as an energy vector. Renewable and Sustainable Energy Reviews [Internet]. 1 de marzo de 2020 [citado 9 de julio de 2023];120:109620. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032119308275>

12. Baykara SZ. Hydrogen: A brief overview on its sources, production and environmental impact. *Int J Hydrogen Energy* [Internet]. 7 de junio de 2018 [citado 13 de marzo de 2023];43(23):10605–14. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319918304002>
13. Olabi AG, Bahri A saleh, Abdelghafar AA, Baroutaji A, Sayed ET, Alami AH, et al. Large-vsacle hydrogen production and storage technologies: Current status and future directions. *Int J Hydrogen Energy* [Internet]. 1 de julio de 2021 [citado 5 de enero de 2023];46(45):23498–528. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319920339276>
14. Mazloomi K, Gomes C. Hydrogen as an energy carrier: Prospects and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [Internet]. 1 de junio de 2012 [citado 16 de julio de 2023];16(5):3024–33. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032112001220>
15. Miller J, Visicdi L. Innovación en energía limpia en América Latina [Internet]. 2016 [citado 11 de abril de 2024]. Disponible en: [https://ikels-dspace.azurewebsites.net/bitstream/handle/123456789/838/Innovación en energía limpia en América Latina.pdf?sequence=1](https://ikels-dspace.azurewebsites.net/bitstream/handle/123456789/838/Innovación%20en%20energía%20limpia%20en%20América%20Latina.pdf?sequence=1)
16. Luizaga Velasco AB, Berigüete Alcántara FE, Rodríguez Cantalapiedra IR. Economía circular, energía limpia y ciudadanía en América Latina y El Caribe: nuevos retos y oportunidades hacia ciudades sostenibles y resilientes [Internet]. *Universitat Politècnica de Catalunya*; 2022 [citado 11 de abril de 2024]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/368399>
17. Reyes Gil RE, Turriago Hoyos Á, Luis Á, Mercado Suarez ÁL. Las Energías Renovables no convencionales en Colombia: Hacia una matriz energética más limpia. *REVISTA DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA, TECNOLÓGICA Y CULTURAL* [Internet]. 2023 [citado 12 de abril de 2024];7(2711–3817):5. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11371/6059>
18. Wyczykier G. Senderos de la transición energética: el hidrógeno verde en la era del cambio climático. *Revista Temas Sociológicos* [Internet]. 2022 [citado 12 de abril de 2024];31(0719–6458):453–84. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8823170>
19. Ministerio de Minas y Energía. *minenergia.gov.co*. 2021 [citado 10 de abril de 2024]. p. 54 Hoja de ruta para el hidrógeno en Colombia. Disponible en: <https://www.minenergia.gov.co/es/micrositios/enlace-ruta-hidrogeno/>
20. Muñoz Soto BJ, Zúliga Calderón JA. Informe de Vigilancia Tecnológica: Producción de hidrógeno verde para descarbonizar las actividades económicas en Costa Rica [Internet]. *Universidad de Costa Rica*; 2022 [citado 12 de abril de 2024]. Disponible en: [https://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/86773/Informe de Vigilancia Tecnológica_Producción de hidrógeno verde para descarbonizar las actividades económicas en Costa Rica.pdf?sequence=1](https://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/86773/Informe%20de%20Vigilancia%20Tecnológica_Producción%20de%20hidrógeno%20verde%20para%20descarbonizar%20las%20actividades%20económicas%20en%20Costa%20Rica.pdf?sequence=1)
21. Rupérez Cerqueda M. OBS Business School. 2022 [citado 4 de septiembre de 2023]. Informe OBS: Mercado del Hidrógeno 2022. Disponible en: <https://www.obsbusiness.school/actualidad/informes-de-investigacion/informe-obs-mercado-del-hidrogeno-2022>
22. IEA. *Global Hydrogen Review 2022* [Internet]. 2022 [citado 5 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022/executive-summary>

23. Crespo Garay C. National Geographic. 2022 [citado 12 de marzo de 2024]. Hacia la transición energética: el nuevo método para producir hidrógeno de forma industrial. Disponible en: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2022/04/hacia-la-transicion-energetica-el-nuevo-metodo-para-producir-hidrogeno-de-forma-industrial>
24. IEA. Global Hydrogen Review 2021 [Internet]. 2021 [citado 5 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021/executive-summary>
25. Arcos JMM, Santos DMF. The Hydrogen Color Spectrum: Techno-Economic Analysis of the Available Technologies for Hydrogen Production. *Gases* 2023, Vol 3, Pages 25-46 [Internet]. 3 de febrero de 2023 [citado 4 de septiembre de 2023];3(1):25–46. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2673-5628/3/1/2/htm>
26. Incer-Valverde J, Korayem A, Tsatsaronis G, Morosuk T. “Colors” of hydrogen: Definitions and carbon intensity. *Energy Convers Manag* [Internet]. 1 de septiembre de 2023 [citado 19 de septiembre de 2023];291:117294. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890423006404>
27. Dash SK, Chakraborty S, Elangovan D. A Brief Review of Hydrogen Production Methods and Their Challenges. *Energies* 2023, Vol 16, Page 1141 [Internet]. 20 de enero de 2023 [citado 3 de septiembre de 2023];16(3):1141. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/3/1141/htm>
28. Brijaldo MH, Castillo C, Pérez G. Principales Rutas en la Producción de Hidrógeno. *Ingeniería y Competitividad* [Internet]. 4 de julio de 2021 [citado 14 de mayo de 2024];23(2):e30211155. Disponible en: https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/11155
29. Ozcan H, El-Emam RS, Amini Horri B. Thermochemical looping technologies for clean hydrogen production – Current status and recent advances. *J Clean Prod* [Internet]. 1 de enero de 2023 [citado 5 de enero de 2023];382:135295. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652622048697>
30. Wang Z, Gong Z, Turap Y, Wang Y, Zhang Z, Wang W. Renewable hydrogen production from biogas using iron-based chemical looping technology. *Chemical Engineering Journal* [Internet]. 1 de febrero de 2022 [citado 5 de enero de 2023];429:132192. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1385894721037712>
31. Das S, Biswas A, Tiwary CS, Paliwal M. Hydrogen production using chemical looping technology: A review with emphasis on H₂ yield of various oxygen carriers. *Int J Hydrogen Energy* [Internet]. 1 de agosto de 2022 [citado 4 de enero de 2023];47(66):28322–52. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319922028051>
32. Márquez P. J, Márquez OP, Martínez Y, Márquez K, Weinhold E, Ortiz R. Electroquimienergía y cambio climático: Una revisión. *infoANALÍTICA* [Internet]. 2022 [citado 28 de diciembre de 2022];10(1):43–82. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8380347&info=resumen&idioma=ENG>
33. Osorio HC, Babativa JH, Alonso JA. Estudio sobre producción de H₂ con hidroelectricidad para una economía de hidrógeno en Colombia. *Ingeniería y Competitividad* [Internet]. 9 de junio de 2011 [citado 14 de mayo de 2024];12(1):31–42. Disponible en: https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/2700

34. Panić I, Cuculić A, Čelić J. Color-Coded Hydrogen: Production and Storage in Maritime Sector. *Journal of Marine Science and Engineering* 2022, Vol 10, Page 1995 [Internet]. 14 de diciembre de 2022 [citado 4 de septiembre de 2023];10(12):1995. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2077-1312/10/12/1995/htm>
35. CIC energiGUNE. Métodos de producción de hidrógeno y sus colores [Internet]. 2022 [citado 23 de mayo de 2023]. Disponible en: <https://cicenergigune.com/es/blog/metodos-produccion-hidrogeno-colores>
36. Ahmed S, Aitani A, Rahman F, Al-Dawood A, Al-Muhaish F. Decomposition of hydrocarbons to hydrogen and carbon. *Appl Catal A Gen.* 15 de mayo de 2009;359(1–2):1–24.
37. Rojas J, Zhai S, Sun E, Haribal V, Marin-Quiros S, Sarkar A, et al. Technoeconomics and carbon footprint of hydrogen production. *Int J Hydrogen Energy* [Internet]. 11 de enero de 2024 [citado 4 de septiembre de 2023];49:59–74. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319923032718>
38. Hwang JJ. Sustainability study of hydrogen pathways for fuel cell vehicle applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 1 de marzo de 2013;19:220–9.
39. Boretti A, Banik BK. Advances in Hydrogen Production from Natural Gas Reforming. *Advanced Energy and Sustainability Research* [Internet]. 1 de noviembre de 2021 [citado 24 de abril de 2023];2(11):2100097. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/aesr.202100097>
40. Song Y, Han K, Wang D yang. Thermodynamic analysis of fossil fuels reforming for fuel cell application. *Int J Hydrogen Energy* [Internet]. 7 de agosto de 2020 [citado 10 de septiembre de 2023];45(39):20232–9. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319919343988>
41. Ersoz A, Olgun H, Ozdogan S. Reforming options for hydrogen production from fossil fuels for PEM fuel cells. *J Power Sources.* 9 de marzo de 2006;154(1):67–73.
42. Megia PJ, Vizcaino AJ, Calles JA, Carrero A. Hydrogen Production Technologies: From Fossil Fuels toward Renewable Sources. A Mini Review. *Energy and Fuels* [Internet]. 21 de octubre de 2021 [citado 10 de septiembre de 2023];35(20):16403–15. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.energyfuels.1c02501>
43. Energy.gov [Internet]. [citado 10 de septiembre de 2023]. Hydrogen Production: Natural Gas Reforming. Disponible en: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming>
44. Agarwal R. Transition to a Hydrogen-Based Economy: Possibilities and Challenges. *Sustainability* [Internet]. 30 de noviembre de 2022 [citado 4 de septiembre de 2023];14(23):15975. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/23/15975>
45. Al-Qahtani A, Parkinson B, Hellgardt K, Shah N, Guillen-Gosalbez G. Uncovering the true cost of hydrogen production routes using life cycle monetisation. *Appl Energy.* 1 de enero de 2021;281:115958.
46. Shah M, Mondal P, Nayak AK, Bordoloi A. Hydrogen from Natural Gas. En: *Sustainable Utilization of Natural Resources* [Internet]. CRC Press; 2017 [citado 4 de septiembre de 2023]. p. 81–120. Disponible en: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781315153292-4/hydrogen-natural-gas-mumtaj-shah-prasenjit-mondal-ameeya-kumar-nayak-ankur-bordoloi>

47. Arcos JMM, Santos DMF. The Hydrogen Color Spectrum: Techno-Economic Analysis of the Available Technologies for Hydrogen Production. *Gases* 2023, Vol 3, Pages 25-46 [Internet]. 3 de febrero de 2023 [citado 4 de septiembre de 2023];3(1):25–46. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2673-5628/3/1/2/htm>
48. Norouzi N, Fani M. Hydrogen Industry: A Technical, Economic, and Market Analysis Overview. *Trends Journal of Sciences Research* [Internet]. 24 de septiembre de 2021 [citado 4 de septiembre de 2023];1(1):59–84. Disponible en: <https://www.scipublications.com/journal/index.php/ojc/article/view/106>
49. Wheelock Gutiérrez FE. A comparative study of low-emissions hydrogen production processes: Technical limitations and future trends [Internet]. 2023 [citado 4 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://aaltodoc.aalto.fi:443/handle/123456789/121669>
50. Abdalla AM, Abdelrehim O, Wei B, Wang X, Azad AK, Dawood MK. Hydrogen production technologies: Conventional processes. En: *Hydrogen Economy* [Internet]. Elsevier; 2023 [citado 3 de septiembre de 2023]. p. 381–96. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780323995146000042>
51. Dagle RA, Dagle V, Bearden MD, Holladay JD, Krause TR, Ahmed S. An Overview of Natural Gas Conversion Technologies for Co-Production of Hydrogen and Value-Added Solid Carbon Products [Internet]. Richland, WA (United States); 2017 nov [citado 20 de septiembre de 2023]. Disponible en: <http://www.osti.gov/servlets/purl/1411934/>
52. Lui J, Chen WH, Tsang DCW, You S. A critical review on the principles, applications, and challenges of waste-to-hydrogen technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 1 de diciembre de 2020;134:110365.
53. Saraceno E, Ruocco C, Palma V. A Review of Coal and Biomass Hydrogasification: Process Layouts, Hydrogasifiers, and Catalysts. *Catalysts* 2023, Vol 13, Page 417 [Internet]. 15 de febrero de 2023 [citado 12 de marzo de 2024];13(2):417. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2073-4344/13/2/417/htm>
54. Song H, Yang G, Xue P, Li Y, Zou J, Wang S, et al. Recent development of biomass gasification for H₂ rich gas production. *Applications in Energy and Combustion Science*. 1 de junio de 2022;10:100059.
55. Okere CJ, Sheng JJ. Review on clean hydrogen generation from petroleum reservoirs: Fundamentals, mechanisms, and field applications. *Int J Hydrogen Energy*. 30 de junio de 2023;
56. Castiblanco O, Cárdenas DJ. Producción de hidrógeno y su perspectiva en Colombia: una revisión. *Gestión y Ambiente* [Internet]. 1 de julio de 2020 [citado 19 de septiembre de 2023];23(2):299–311. Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/86466>
57. Khan A, Niazi MBK, Ansar R, Jahan Z, Javaid F, Ahmad R, et al. Thermochemical conversion of agricultural waste to hydrogen, methane, and biofuels: A review. *Fuel* [Internet]. noviembre de 2023;351:128947. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236123015600>
58. Wang Q. Hydrogen production. En: *Handbook of Climate Change Mitigation* [Internet]. Springer US; 2012 [citado 3 de septiembre de 2023]. p. 1091–130. Disponible en: https://link-springer-com.bd.univalle.edu.co/referenceworkentry/10.1007/978-1-4419-7991-9_29

59. Stiegel GJ, Ramezan M. Hydrogen from coal gasification: An economical pathway to a sustainable energy future. *Int J Coal Geol.* 17 de enero de 2006;65(3–4):173–90.
60. Acar C, Dincer I. Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources. *Int J Hydrogen Energy.* 2 de enero de 2014;39(1):1–12.
61. Dincer I. Green methods for hydrogen production. *Int J Hydrogen Energy* [Internet]. 1 de enero de 2012 [citado 26 de enero de 2023];37(2):1954–71. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319911019823>
62. Shiva Kumar S, Lim H. An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. *Energy Reports* [Internet]. 1 de noviembre de 2022 [citado 27 de mayo de 2023];8:13793–813. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352484722020625>
63. Li P. Photosynthetic hydrogen production bacteria breeding technologies. En: *Waste to Renewable Biohydrogen* [Internet]. Elsevier; 2021 [citado 5 de enero de 2023]. p. 179–99. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128216590000058>
64. Fabregas E, Huertas BR. Desarrollo de un modelo de funcionamiento de electrolizadores alcalinos autopresurizados, para la optimización de su sistema de control [Internet]. *Universitat Politècnica de Catalunya*; 2020 [citado 24 de marzo de 2023]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/332806>
65. Funk JE. Thermochemical hydrogen production: past and present. *Int J Hydrogen Energy.* 1 de marzo de 2001;26(3):185–90.
66. Lladó ML, Jubert AH. Trabajo útil y su relación con la variación de energía de Gibbs. *Educación química* [Internet]. 2011 [citado 31 de marzo de 2023];22(3):271–6. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-893X2011000300013&lng=es&nrm=iso&tlng=es
67. Santos DMF, Sequeira CAC, Figueiredo JL. Hydrogen production by alkaline water electrolysis. *Quim Nova* [Internet]. 2013 [citado 2 de enero de 2024];36(8):1176–93. Disponible en: <https://www.scielo.br/j/qn/a/KyQvF9DMHK6ZJXyL5zQNy7N/?format=html&lang=en>
68. Martinez-Burgos WJ, de Souza Candeco E, Pedroni Medeiros AB, Cesar de Carvalho J, Oliveira de Andrade Tanobe V, Soccol CR, et al. Hydrogen: Current advances and patented technologies of its renewable production. *J Clean Prod* [Internet]. 1 de marzo de 2021 [citado 5 de enero de 2023];286:124970. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652620350149>
69. Rashid M, Khaloofah M, Mesfer A, Naseem H, Danish M, Al Mesfer MK. Hydrogen production by water electrolysis: a review of alkaline water electrolysis, PEM water electrolysis and high temperature water electrolysis. *researchgate.net* [Internet]. 2015 [citado 6 de julio de 2023];(3):2249–8958. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Hamid-Naseem/publication/273125977_Hydrogen_Production_by_Water_Electrolysis_A_Review_of_Alkaline_Water_Electrolysis_PEM_Water_Electrolysis_and_High_Temperature_Water_Electrolysis/links/54f810100cf28d6dec9fec25/Hydroge
70. Sánchez M. Desarrollo y validación de un modelo para la simulación de sistemas de electrólisis alcalina para la producción de hidrógeno a partir de energías renovables [Internet]. *Universidad Politécnica de Madrid*; 2019 [citado 24 de marzo de 2023]. Disponible en: <http://oa.upm.es/62567/>

71. Amores E, Rodríguez J, Oviedo J, De Lucas-Consuegra A. Development of an operation strategy for hydrogen production using solar PV energy based on fluid dynamic aspects. *Open Engineering* [Internet]. 1 de enero de 2017 [citado 2 de agosto de 2023];7(1):141–52. Disponible en: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/eng-2017-0020/html>
72. Shiva Kumar S, Himabindu V. Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Mater Sci Energy Technol.* 1 de diciembre de 2019;2(3):442–54.
73. Carmo M, Fritz DL, Mergel J, Stolten D. A comprehensive review on PEM water electrolysis. *Int J Hydrogen Energy* [Internet]. 22 de abril de 2013 [citado 31 de julio de 2023];38(12):4901–34. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319913002607>
74. Ayers K. High efficiency PEM water electrolysis: enabled by advanced catalysts, membranes, and processes. *Curr Opin Chem Eng* [Internet]. 1 de septiembre de 2021 [citado 31 de diciembre de 2022];33:100719. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211339821000514>
75. Li R, Li Y, Yang P, Wang D, Xu H, Wang B, et al. Electrodeposition: Synthesis of advanced transition metal-based catalyst for hydrogen production via electrolysis of water. *Journal of Energy Chemistry* [Internet]. 1 de junio de 2021 [citado 31 de diciembre de 2022];57:547–66. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2095495620306033>
76. Burton NA, Padilla RV, Rose A, Habibullah H. Increasing the efficiency of hydrogen production from solar powered water electrolysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [Internet]. 1 de enero de 2021 [citado 31 de diciembre de 2022];135:110255. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S136403212030544X>
77. Song J, Wei C, Huang ZF, Liu C, Zeng L, Wang X, et al. A review on fundamentals for designing oxygen evolution electrocatalysts. *Chem Soc Rev* [Internet]. 7 de abril de 2020 [citado 26 de diciembre de 2023];49(7):2196–214. Disponible en: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2020/cs/c9cs00607a>
78. Liu L. Platinum group metal free nano-catalysts for proton exchange membrane water electrolysis. *Curr Opin Chem Eng* [Internet]. 1 de diciembre de 2021 [citado 31 de diciembre de 2022];34:100743. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211339821000757>
79. Angeles-Olvera Z, Crespo-Yapur A, Rodríguez O, Cholula-Díaz JL, Martínez LM, Videá M. Nickel-Based Electrocatalysts for Water Electrolysis. *Energies* 2022, Vol 15, Page 1609 [Internet]. 22 de febrero de 2022 [citado 31 de diciembre de 2022];15(5):1609. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/5/1609/htm>
80. Chen Z, Wei W, Song L, Ni BJ. Hybrid Water Electrolysis: A New Sustainable Avenue for Energy-Saving Hydrogen Production. *Sustainable Horizons* [Internet]. 1 de enero de 2022 [citado 28 de diciembre de 2022];1:100002. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S277273782100002X>
81. Pal DB, Singh A, Bhatnagar A. A review on biomass based hydrogen production technologies. *Int J Hydrogen Energy* [Internet]. 8 de enero de 2022 [citado 4 de enero de 2023];47(3):1461–80. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319921041562>
82. Martino M, Ruocco C, Meloni E, Pullumbi P, Palma V. Main Hydrogen Production Processes: An Overview. *Catalysts* 2021, Vol 11, Page 547 [Internet]. 25 de abril de 2021 [citado 30 de enero de 2023];11(5):547. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2073-4344/11/5/547/htm>

83. Singla S, Shetti NP, Basu S, Mondal K, Aminabhavi TM. Hydrogen production technologies - Membrane based separation, storage and challenges. *J Environ Manage* [Internet]. 15 de enero de 2022 [citado 4 de enero de 2023];302:113963. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479721020259>
84. Laurinavichene T, Tekucheva D, Laurinavichius K, Tsygankov A. Utilization of distillery wastewater for hydrogen production in one-stage and two-stage processes involving photofermentation. *Enzyme Microb Technol* [Internet]. 1 de marzo de 2018 [citado 16 de enero de 2024];110:1–7. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141022917302156>
85. Hu B, Li Y, Zhu S, Zhang H, Jing Y, Jiang D, et al. Evaluation of biohydrogen yield potential and electron balance in the photo-fermentation process with different initial pH from starch agricultural leftover. *Bioresour Technol* [Internet]. 1 de junio de 2020 [citado 28 de enero de 2024];305:122900. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852420301693>
86. Lu C, Jing Y, Zhang H, Lee DJ, Tahir N, Zhang Q, et al. Biohydrogen production through active saccharification and photo-fermentation from alfalfa. *Bioresour Technol*. 1 de mayo de 2020;304:123007.
87. Al-Mohammedawi HH, Znad H, Eroglu E. Improvement of photofermentative biohydrogen production using pre-treated brewery wastewater with banana peels waste. *Int J Hydrogen Energy*. 28 de enero de 2019;44(5):2560–8.
88. Yang Y, Bu J, Tiong YW, Xu S, Zhang J, He Y, et al. Enhanced thermophilic dark fermentation of hydrogen production from food waste by Fe-modified biochar. *Environ Res*. 1 de marzo de 2024;244:117946.
89. Cieciora-Włoch W, Borowski S, Domański J. Dark fermentative hydrogen production from hydrolyzed sugar beet pulp improved by nitrogen and phosphorus supplementation. *Bioresour Technol*. 1 de noviembre de 2021;340:125622.
90. Singh S, Sarma PM, Lal B. Biohydrogen production by *Thermoanaerobacterium thermosaccharolyticum* TERI S7 from oil reservoir flow pipeline. *Int J Hydrogen Energy*. 18 de marzo de 2014;39(9):4206–14.
91. Karaosmanoglu Gorgec F, Karapinar I. Biohydrogen production from hydrolyzed waste wheat by dark fermentation in a continuously operated packed bed reactor: The effect of hydraulic retention time. *Int J Hydrogen Energy*. 1 de enero de 2019;44(1):136–43.
92. Ren N, Guo W, Liu B, Cao G, Ding J. Biological hydrogen production by dark fermentation: challenges and prospects towards scaled-up production. *Curr Opin Biotechnol* [Internet]. 1 de junio de 2011 [citado 19 de julio de 2023];22(3):365–70. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958166911000851>
93. Eroglu E, Melis A. Photobiological hydrogen production: Recent advances and state of the art. *Bioresour Technol* [Internet]. 1 de septiembre de 2011 [citado 16 de enero de 2024];102(18):8403–13. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852411003683>
94. Putatunda C, Behl M, Solanki P, Sharma S, Bhatia SK, Walia A, et al. Current challenges and future technology in photofermentation-driven biohydrogen production by utilizing algae and bacteria. *Int J Hydrogen Energy*. 30 de junio de 2023;48(55):21088–109.



95. Schumann C, Fernández Méndez J, Berggren G, Lindblad P. Novel concepts and engineering strategies for heterologous expression of efficient hydrogenases in photosynthetic microorganisms. *Front Microbiol* [Internet]. 12 de julio de 2023 [citado 27 de agosto de 2023];14:1179607. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2023.1179607/full>
96. Ivanenko AA, Laikova AA, Zhuravleva EA, Shekhurdina SV, Vishnyakova AV, Kovalev AA, et al. Biological production of hydrogen: From basic principles to the latest advances in process improvement. *Int J Hydrogen Energy* [Internet]. 15 de febrero de 2024 [citado 7 de enero de 2024];55:740–55. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319923059244>
97. Mona S, Kumar SS, Kumar V, Parveen K, Saini N, Deepak B, et al. Green technology for sustainable biohydrogen production (waste to energy): A review. *Science of The Total Environment* [Internet]. 1 de agosto de 2020 [citado 3 de febrero de 2024];728:138481. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S004896972031994X>
98. Nagarajan D, Dong C Di, Chen CY, Lee DJ, Chang JS. Biohydrogen production from microalgae—Major bottlenecks and future research perspectives. *Biotechnol J* [Internet]. 1 de mayo de 2021 [citado 3 de febrero de 2024];16(5):2000124. Disponible en: <https://onlinelibrary-wiley-com.bd.univalle.edu.co/doi/full/10.1002/biot.202000124>
99. Kosourov S, Böhm M, Senger M, Berggren G, Stensjö K, Mamedov F, et al. Photosynthetic hydrogen production: Novel protocols, promising engineering approaches and application of semi-synthetic hydrogenases. *Physiol Plant* [Internet]. 2 de octubre de 2021 [citado 2 de febrero de 2024];173(2):555–67. Disponible en: <https://onlinelibrary-wiley-com.bd.univalle.edu.co/doi/full/10.1111/ppl.13428>
100. Kamshybayeva GK, Kossalbayev BD, Sadvakasova AK, Kakimova AB, Bauenova MO, Zayadan BK, et al. Genetic engineering contribution to developing cyanobacteria-based hydrogen energy to reduce carbon emissions and establish a hydrogen economy. *Int J Hydrogen Energy*. 7 de febrero de 2024;54:491–511.
101. Kossalbayev BD, Yilmaz G, Sadvakasova AK, Zayadan BK, Belkozhashev AM, Kamshybayeva GK, et al. Biotechnological production of hydrogen: Design features of photobioreactors and improvement of conditions for cultivating cyanobacteria. *Int J Hydrogen Energy*. 2 de enero de 2024;49:413–32.
102. Bozieva AM, Khasimov MK, Voloshin RA, Sinetova MA, Kupriyanova E V., Zharmukhamedov SK, et al. New cyanobacterial strains for biohydrogen production. *Int J Hydrogen Energy* [Internet]. 8 de marzo de 2023 [citado 3 de febrero de 2024];48(21):7569–81. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319922055148>
103. Jensen LS, Kaul C, Juncker NB, Thomsen MH, Chaturvedi T. Biohydrogen Production in Microbial Electrolysis Cells Utilizing Organic Residue Feedstock: A Review. *Energies* 2022, Vol 15, Page 8396 [Internet]. 10 de noviembre de 2022 [citado 3 de febrero de 2024];15(22):8396. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/22/8396/htm>
104. Saravanan A, Karishma S, Kumar PS, Yaashikaa PR, Jeevanantham S, Gayathri B. Microbial electrolysis cells and microbial fuel cells for biohydrogen production: current advances and emerging challenges. *Biomass Conversion and Biorefinery* 2020 13:10 [Internet]. 27 de agosto de 2020 [citado 3 de febrero de 2024];13(10):8403–23. Disponible en: <https://link-springer-com.bd.univalle.edu.co/article/10.1007/s13399-020-00973-x>



105. Lazar D, Lu ZH, Yumnam P, Debnath P. A Review on Mathematical Modeling of Different Biological Methods of Hydrogen Production. *Hydrogen* 2023, Vol 4, Pages 881–916 [Internet]. 1 de noviembre de 2023 [citado 3 de febrero de 2024];4(4):881–916. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2673-4141/4/4/53/htm>
106. Murugaiyan J, Narayanan A, Naina Mohamed S. An overview of microbial electrolysis cell configuration: Challenges and prospects on biohydrogen production. *Int J Energy Res* [Internet]. 1 de noviembre de 2022 [citado 3 de febrero de 2024];46(14):20811–27. Disponible en: <https://onlinelibrary-wiley-com.bd.univalle.edu.co/doi/full/10.1002/er.8494>
107. Jayabalan T, Matheswaran M, Preethi V, Naina Mohamed S. Enhancing biohydrogen production from sugar industry wastewater using metal oxide/graphene nanocomposite catalysts in microbial electrolysis cell. *Int J Hydrogen Energy* [Internet]. 6 de marzo de 2020 [citado 3 de febrero de 2024];45(13):7647–55. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319919333828>
108. Wang L, Linowski K, Liu H. Scalable membrane-less microbial electrolysis cell with multiple compact electrode assemblies for high performance hydrogen production. *Chemical Engineering Journal*. 15 de febrero de 2023;454:140257.
109. San-Martín MI, Sotres A, Alonso RM, Díaz-Marcos J, Morán A, Escapa A. Assessing anodic microbial populations and membrane ageing in a pilot microbial electrolysis cell. *Int J Hydrogen Energy*. 28 de junio de 2019;44(32):17304–15.
110. Batlle-Vilanova P, Puig S, Gonzalez-Olmos R, Vilajeliu-Pons A, Bañeras L, Balaguer MD, et al. Assessment of biotic and abiotic graphite cathodes for hydrogen production in microbial electrolysis cells. *Int J Hydrogen Energy*. 16 de enero de 2014;39(3):1297–305.
111. Dai H, Yang H, Liu X, Jian X, Liang Z. Electrochemical evaluation of nano-Mg(OH)₂/graphene as a catalyst for hydrogen evolution in microbial electrolysis cell. *Fuel*. 15 de junio de 2016;174:251–6.