

REVISION DEL ESTADO DEL ARTE DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LOS
PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE

Eliana Catalina Albino Santos

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniera Metalúrgica

Director:

Darío Yesid Peña Ballesteros

PhD. en Corrosión

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2026

Agradecimientos

A Dios primero, fuente de vida y sabiduría infinita, mi guía en cada paso del camino, por la fortaleza para perseverar, la claridad y el amor, resultado de su gracia y su plan perfecto.

A mis padres Uriel Arturo Albino Pilonieta y María Claudia Santos Cordero por su amor y sus sacrificios, cada regaño, cada palabra de aliento han sido importantes para alcanzar este logro que también es de ustedes.

A mi hermana Soraya Isabella, por su apoyo y compañía, dentro de poco estaremos celebrando tu logro como futura geóloga.

A mis amigos y compañeros que me dejó la UIS, gracias por los momentos compartidos, los lazos de amistad formados y las palabras de aliento cuando las cosas se ponían difíciles, dando ese granito de arena para que este sueño se hiciera realidad.

Al profe Darío Peña, por su acompañamiento, disposición y consejo, parte importante en mi vida académica.

A la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de materiales en el que la UIS me dio una segunda oportunidad no sólo de ser profesional, sino también de crecer como persona en muchos ámbitos de mi vida, a todos los profesores y administrativos.

Y por último a mí, por no desistir, por mi resiliencia, el amor propio que me impulsó a seguir adelante convenciéndome de que nunca es tarde para lograr mis metas.

¡Gracias Totales!

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	10
1.Descripción del problema	11
1.1Objetivos.....	13
1.1.1 Objetivo General.....	13
1.2 Metodología.....	13
1.2.1 Identificación de fuentes y estrategia de búsqueda.....	14
1.2.2 Selección de documentos mediante criterios de inclusión y exclusión	14
1.2.3 Extracción, organización y análisis de la información	16
1.2.4 Evaluación de desafíos tecnológicos y elaboración de conclusiones	17
2. Contextualización.....	17
2.1 Hidrógeno verde.....	19
2.2 Producción de hidrógeno verde.....	19
2.2.1 Electrólisis.....	19
2.2.2 Procesos termoquímicos	25
2.2.3 Métodos biológicos	26
3. Análisis de resultados.....	27
3.1 Materiales utilizados en los procesos de producción de hidrógeno verde	28
3.1.1 Electrólisis	28
3.1.1.1 Metales nobles.....	31
3.1.1.2 Metales de transición.	33
3.1.1.3 Sulfuros, fosfuros y carburos.	35
3.1.1.4 MOFs y materiales derivados	38

MATERIALES UTILIZADOS EN LOS PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE	4
3.1.1.5 Polímeros conductores y materiales carbonosos	39
3.1.1.6 Estrategias emergentes: catalizadores de átomo único y sustitución de la OER.	42
3.1.2 <i>Procesos termoquímicos</i>	43
3.1.2.1 Óxidos metálicos y perovskitas.	45
3.1.2.2 Catalizadores metálicos para reformado	48
3.1.2.3 Rutas catalíticas derivadas de biomasa y estrategias emergentes	49
3.1.3 <i>Métodos biológicos</i>	51
3.1.3.1 Nanotecnología aplicada a procesos biológicos.	52
3.1.3.2 Producción de biohidrógeno a partir de biomasa vegetal.	52
3.3 Comparación global de materiales	53
3.4 Desafíos tecnológicos asociados a los materiales para la producción de hidrógeno verde	56
3.4.1 Dependencia de materiales críticos y costos de producción	56
3.4.2 Degradación de materiales y control de la corrosión	57
3.4.3 Calidad del agua y condiciones de operación	59
3.4.4 Limitaciones de eficiencia y desempeño catalítico	59
3.4.5 Escalabilidad industrial y sostenibilidad.....	61
4. Conclusiones	62
5. Recomendaciones.....	63
Referencias bibliográficas	64
Apéndices.....	74

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Criterios de inclusión y exclusión aplicados en la selección documental.....</i>	14
Tabla 2 <i>Materiales reportados en procesos de electrólisis para la producción de hidrógeno verde.</i>	28
Tabla 3 <i>Materiales reportados en procesos termoquímicos para la producción de hidrógeno verde.</i>	44
Tabla 4 <i>Materiales reportados en métodos biológicos para la producción de hidrógeno verde.</i>	51
Tabla 5 <i>Comparación de materiales utilizados en la producción de hidrógeno verde según función, abundancia, costo, eficiencia y durabilidad</i>	53

Lista de figuras

Figura 1 Diagrama de flujo del proceso de selección documental basado en la metodología PRISMA.....	16
Figura 2 Tipos de hidrógeno según su método de producción	18
Figura 3 Esquema típico de un proceso de electrólisis	19
Figura 4 Funcionamiento de un electrolizador alcalino	21
Figura 5 Funcionamiento de un electrolizador PEM.....	23
Figura 6 Funcionamiento de un electrolizador SOEC.....	24
Figura 7 Esquema de una pila de combustible microbiana	26
Figura 8 Eficiencia de las reacciones OER (A) y HER (B) en función del potencial aplicado. 32	
Figura 9 Comportamiento electroquímico, curvas de polarización OER/HER y estabilidad a largo plazo del sistema Co-Fe ₂ O ₃	33
Figura 10 Producción fotocatalítica de hidrógeno y estabilidad del sistema CdS/MoS ₂ : (A) velocidad de evolución de H ₂ y (B) estabilidad durante ciclos fotocatalíticos.	36
Figura 11 Desempeño electroquímico y estabilidad del sistema Ni ₂ P-CuP ₂ : (A) curvas LSV, (B) pendientes de Tafel, (C) estabilidad a largo plazo y (D) comparación antes y después de 10 000 ciclos.	37
Figura 12 Curvas de Tafel para la reacción de evolución de oxígeno (OER) en sistemas ZnCo ₂ O ₄ /PPy con diferentes condiciones de síntesis.	40

Figura 13 Comparación de las curvas LSV del sistema PANI/CD para electrólisis asistida por luz en condiciones de oscuridad e iluminación.	41
Figura 14 Desempeño fotoelectroquímico del sistema $WO_3/g-C_3N_4 Ni$: (A) curvas LSV y (B) estabilidad y evolución de H_2	43
Figura 15 Liberación de O_2 y producción de H_2 durante ocho ciclos termoquímicos consecutivos empleando nanofibras de CeO_2 –mullita.	46
Figura 16 Variación de la energía libre de Gibbs ($\Delta G_r, T$) de diferentes óxidos metálicos en función de la temperatura de reducción.	47
Figura 17 Esquema general de las reacciones de deshidrogenación aceptora-libre empleadas para la producción de hidrógeno a partir de compuestos derivados de biomasa.	50

Resumen

Título: Revisión del Estado del Arte de los Materiales Utilizados en los Procesos de Producción de Hidrógeno Verde*

Autor: Eliana Catalina Albino Santos**

Palabras Clave: Hidrógeno verde, materiales avanzados, electrólisis, sostenibilidad, foto-electrocatalisis, fermentación anaeróbica, catalizadores, transición energética.

Descripción:

Esta investigación revisó el estado del arte de los materiales utilizados en los procesos de producción de hidrógeno verde con el propósito de identificar los principales desafíos tecnológicos asociados a su aplicación. La revisión se realizó siguiendo la metodología PRISMA, a partir de publicaciones recuperadas principalmente en Scopus y complementadas con otras fuentes académicas. Después del proceso de búsqueda, selección y evaluación de la literatura, se analizaron 42 estudios relacionados con electrólisis, procesos termoquímicos y métodos biológicos de producción de hidrógeno.

La revisión mostró el uso de una amplia variedad de materiales, entre ellos metales nobles, metales de transición, óxidos, fosfuros, sulfuros, carburos, materiales derivados de estructuras metal-orgánicas (MOFs) y sistemas híbridos. Los metales nobles mantuvieron el mejor desempeño catalítico, mientras que materiales basados en Fe, Ni, Co y Mn surgieron como alternativas viables por su mayor disponibilidad y menor costo. También se evidenciaron desafíos relacionados con la dependencia de materiales críticos, la degradación y corrosión de componentes, la calidad del agua, las limitaciones de eficiencia catalítica y las dificultades para escalar estas tecnologías a nivel industrial. En conjunto, los resultados indican que el desarrollo de materiales más estables,

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de Materiales. Ingeniería Metalúrgica. Director: Darío Yesid Peña Ballesteros. PhD. en corrosión.

eficientes y económicamente viables será determinante para ampliar la producción sostenible de hidrógeno verde.

Abstract

Title: Review of the State of the Art of Materials Used in Green Hydrogen Production Processes*

Author(s): Eliana Catalina Albino Santos 1

Key Words: Green hydrogen, advanced materials, electrolysis, sustainability, photo-electrocatalysis, anaerobic fermentation, catalysts, energy transition.

Description:

This study reviewed the state of the art of the materials used in green hydrogen production processes to identify the main technological challenges associated with their application. The review followed the PRISMA methodology and was based primarily on publications retrieved from Scopus, complemented by other academic sources. After the search, selection, and evaluation process, 42 studies related to electrolysis, thermochemical processes, and biological methods for hydrogen production were analyzed.

The review revealed the use of a wide range of materials, including noble metals, transition metals, oxides, phosphides, sulfides, carbides, metal–organic framework (MOF)-derived materials, and hybrid systems. Noble metals consistently exhibited the highest catalytic performance, whereas materials based on Fe, Ni, Co, and Mn emerged as promising alternatives due to their greater availability and lower cost. The analysis also identified challenges related to the dependence on critical materials, component degradation and corrosion, water quality requirements, catalytic efficiency limitations, and the difficulties associated with industrial-scale implementation. Overall, the findings indicate that developing more stable, efficient, and economically viable materials will be essential to expand the sustainable production of green hydrogen.

**Degree Work

**Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Metallurgical Engineering. Supervisor: Darío Yesid Peña Ballesteros, PhD. In Corrosion.

Introducción

La investigación en hidrógeno verde ha experimentado un crecimiento en los últimos años, impulsando el desarrollo de nuevas tecnologías orientadas a mejorar los procesos de producción, conversión y almacenamiento energético. Este avance ha generado una expansión considerable del conocimiento científico y tecnológico asociado a las diferentes rutas de producción de hidrógeno (Tuluhong et al., 2024).

Dentro de este contexto, los materiales han adquirido un papel central debido a la diversidad de funciones que desempeñan en los sistemas de producción. Catalizadores, membranas, soportes, fotoelectrodos y materiales estructurales participan directamente en fenómenos relacionados con la transferencia de carga, la actividad catalítica, la estabilidad operativa y la durabilidad de los sistemas, influyendo de manera directa en su desempeño (Vinodh et al., 2024).

Los avances actuales han permitido el desarrollo de materiales cada vez más especializados, incluyendo óxidos metálicos, fosfuros, sulfuros, carburos, nanoestructuras híbridas y otros materiales diseñados mediante estrategias de dopaje e ingeniería estructural. Estas investigaciones han ampliado las posibilidades de diseño de sistemas para la producción de hidrógeno y han contribuido a mejorar sus propiedades catalíticas y funcionales (Kazemi et al., 2024).

Paralelamente, la diversidad de enfoques utilizados para el desarrollo de nuevos materiales refleja la rápida evolución de este campo de investigación. Esta situación demuestra la necesidad de integrar y analizar la información disponible para identificar tendencias de

investigación, materiales de interés y oportunidades de desarrollo tecnológico (Kumar et al., 2025).

De acuerdo con lo expuesto, esta investigación realiza una revisión del estado del arte de los materiales utilizados en la producción de hidrógeno verde, analizando sus principales aplicaciones, propiedades y desafíos tecnológicos, con el propósito de aportar una visión integral del conocimiento disponible en esta área.

1. Descripción del problema

El cambio climático y la seguridad del suministro energético ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles. En este contexto, el hidrógeno (H_2) se ha consolidado como una de las alternativas energéticas más prometedoras gracias a su alta densidad energética y a que puede producirse sin generar emisiones directas de CO_2 durante su utilización (Abe, 2019). No obstante, más del 95 % del hidrógeno que se produce actualmente se obtiene a partir de combustibles fósiles, principalmente mediante el reformado de gas natural, una ruta que genera elevadas emisiones de CO_2 y depende de recursos no renovables (IEA, 2021).

Este panorama ha impulsado el desarrollo de tecnologías para producir hidrógeno verde a partir de fuentes renovables. Entre ellas, la electrólisis del agua sobresale porque permite obtener hidrógeno y oxígeno mediante electricidad. Cuando esta energía proviene de fuentes renovables, como la solar o la eólica, el hidrógeno presenta una huella de carbono cercana a cero y adquiere un papel estratégico en la transición energética (Dawood et al., 2020).

A pesar de su potencial, la producción de hidrógeno verde a gran escala continúa enfrentando barreras técnicas y económicas que limitan su competitividad frente a las rutas

convencionales. Estos desafíos están estrechamente relacionados con los materiales empleados en los sistemas de electrólisis, ya que la eficiencia, durabilidad y costo de los electrolizadores dependen de sus componentes. Entre ellos destacan los electrocatalizadores, las membranas de separación y los materiales estructurales sometidos a condiciones operativas exigentes (Buttler y Spliethoff, 2018).

La ingeniería de materiales, especialmente la ingeniería metalúrgica, desempeña un papel clave en el desarrollo del hidrógeno verde. Las principales líneas de investigación son el diseño de catalizadores con menor dependencia de metales críticos como platino e iridio, el desarrollo de membranas más eficientes y duraderas, y la obtención de aleaciones y recubrimientos resistentes a la corrosión. La optimización de estos materiales mejora el rendimiento de los sistemas y reduce los costos de capital (CAPEX) y operación (OPEX), favoreciendo su viabilidad comercial.

En Colombia, el desarrollo de la economía del hidrógeno ha avanzado mediante iniciativas orientadas a la producción de hidrógeno de bajas emisiones. Según Hidrógeno Colombia (2023), el país cuenta con 28 proyectos en desarrollo, de los cuales 18 incorporan electrolizadores; 13 utilizan tecnología de membrana de intercambio protónico (PEM) y 5 electrólisis alcalina. Estas iniciativas podrían representar una capacidad instalada cercana a 4 GW, evidenciando el creciente interés por la implementación nuevas tecnologías.

Considerando lo anterior, resulta necesario analizar los materiales reportados en la literatura científica para la producción de hidrógeno verde, considerando sus propiedades, aplicaciones, ventajas y limitaciones. Este análisis permitirá fortalecer la base de conocimiento disponible y contribuir al desarrollo de futuras investigaciones y tecnologías orientadas a la producción sostenible de hidrógeno.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Investigar el estado del arte actual de los materiales utilizados para los procesos de producción de hidrógeno verde.

1.1.2 Objetivos específicos

Identificar mediante revisión bibliográfica los materiales empleados los procesos de producción de hidrógeno verde y evaluar sus propiedades, considerando factores como eficiencia, durabilidad, abundancia, costos y sostenibilidad ambiental.

Analizar los desafíos tecnológicos que aún persisten en cuanto a la aplicabilidad de los materiales en los procesos de producción, con el propósito de establecer bases para futuras investigaciones.

1.2 Metodología

Esta investigación se basó en una revisión sistemática de la literatura científica para examinar el estado del arte de los materiales utilizados en los procesos de producción de hidrógeno verde. La selección de las publicaciones se realizó siguiendo los lineamientos del método PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) adaptados a los objetivos y al alcance de la monografía.

El procedimiento metodológico se estructuró en cuatro etapas secuenciales: identificación de fuentes bibliográficas, selección y depuración de documentos, extracción y análisis de información técnica, y evaluación de los desafíos tecnológicos reportados en la literatura.

1.2.1 Identificación de fuentes y estrategia de búsqueda

La búsqueda bibliográfica se realizó mediante los recursos electrónicos suscritos por la Universidad Industrial de Santander, utilizando principalmente la base de datos Scopus (Elsevier BV), complementada con otras fuentes académicas especializadas.

Con el propósito de recuperar publicaciones relacionadas con materiales utilizados en la producción de hidrógeno verde, se empleó una estrategia de búsqueda basada en operadores booleanos, utilizando la siguiente ecuación: ("green hydrogen" OR "hydrogen production") AND (material* OR electrocatalyst* OR catalyst* OR membrane* OR photocatalyst*) AND (electrolysis OR thermochemical OR biological OR "water splitting")

La búsqueda se enfocó en la identificación de materiales y sistemas catalíticos utilizados en procesos de electrólisis, rutas termoquímicas y métodos biológicos para la producción de hidrógeno verde.

1.2.2 Selección de documentos mediante criterios de inclusión y exclusión.

La selección de documentos se realizó siguiendo la lógica de cribado propuesta por la metodología PRISMA. Inicialmente se identificaron publicaciones potencialmente relevantes relacionadas con materiales para producción de hidrógeno verde. Posteriormente se efectuó una revisión de títulos, resúmenes y palabras clave para determinar su pertinencia. En la **Tabla 1** se presentan los criterios de inclusión y exclusión utilizados durante la selección de los documentos.

Tabla 1

Criterios de inclusión y exclusión aplicados en la selección documental

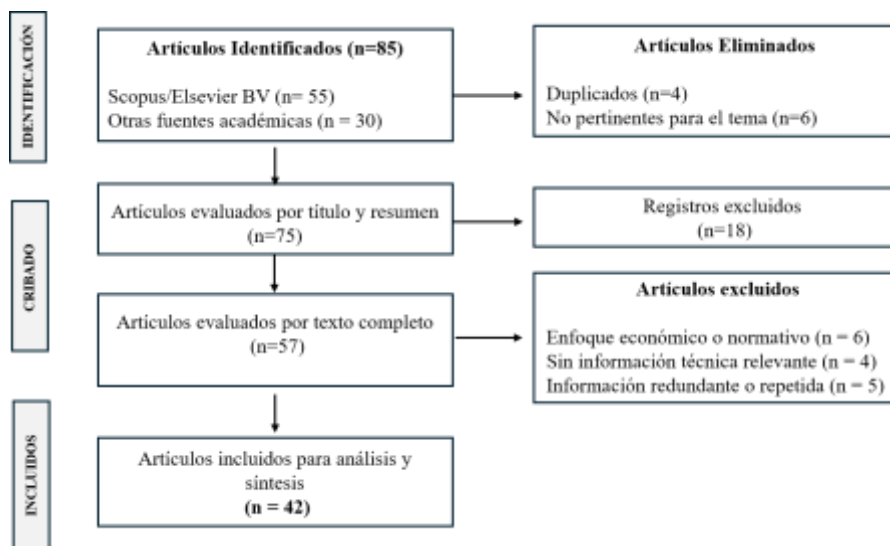
Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
• Artículos científicos publicados en revistas especializadas • Libros y capítulos de libro con contenido técnico especializado. • Estudios publicados principalmente entre los años 2020 y 2025. • Investigaciones relacionadas con materiales utilizados en electrólisis, procesos termoquímicos o métodos biológicos de producción de hidrógeno. • Trabajos que reportaran propiedades, desempeño, estabilidad o aplicaciones de materiales para la producción de hidrógeno verde.	• Estudios enfocados exclusivamente en aspectos económicos, regulatorios o políticos. • Publicaciones sin información experimental o técnica relacionada con materiales. • Documentos duplicados o con información redundante. • Trabajos cuyo contenido no aportara información relevante para el cumplimiento de los objetivos planteados.

Nota. Elaboración propia

Después del proceso de selección y depuración documental, se conformó una muestra final de 42 publicaciones científicas, las cuales constituyen la base del análisis desarrollado en la presente investigación. El proceso de identificación, selección, evaluación y depuración de los documentos analizados se muestra en la **Figura 1**

Figura 1

Diagrama de flujo del proceso de selección documental basado en la metodología PRISMA.



Nota. Elaboración propia.

1.2.3 Extracción, organización y análisis de la información

Una vez seleccionados los documentos, se realizó una lectura crítica y sistemática de cada publicación con el propósito de identificar los materiales empleados en las diferentes rutas de producción de hidrógeno verde.

La información recopilada fue clasificada inicialmente según la ruta tecnológica de producción de hidrógeno verde: electrólisis, procesos termoquímicos y métodos biológicos. Posteriormente, los materiales identificados en cada categoría fueron organizados en matrices comparativas para facilitar su análisis.

Para cada material se registraron variables relacionadas con sus propiedades físicas y químicas, abundancia relativa, costos, desempeño, estabilidad y aplicaciones dentro de los sistemas de producción de hidrógeno.

Luego se realizó un análisis comparativo de la información recopilada con el fin de identificar tendencias tecnológicas, ventajas, limitaciones y potencial de los materiales reportados en la literatura científica.

1.2.4 Evaluación de desafíos tecnológicos y elaboración de conclusiones

Se efectuó una evaluación crítica de los principales desafíos tecnológicos asociados al uso de materiales para la producción de hidrógeno verde.

Los hallazgos fueron organizados según la ruta tecnológica estudiada, identificando aspectos relacionados con corrosión, degradación de membranas, dependencia de metales nobles, eficiencia energética, costos y escalabilidad industrial.

A partir del análisis realizado se formularon las conclusiones y recomendaciones orientadas a identificar oportunidades de mejora y posibles líneas futuras de investigación en el área de materiales para la producción de hidrógeno verde.

2. Contextualización

El hidrógeno (H_2) es el elemento más ligero y abundante del universo que representa cerca del 75% de su composición (Alzahrani, 2023).

Su elevada densidad energética gravimétrica lo convierte en una alternativa con gran potencial para la transición hacia sistemas energéticos más sostenibles. En la naturaleza se encuentra combinado con otros elementos, como el oxígeno en el agua o el carbono en compuestos orgánicos, por esta razón, el gas debe obtenerse mediante procesos tecnológicos. Su capacidad de almacenamiento y transporte hace que sea considerado un vector energético y no una fuente primaria de energía. (Acciona, 2020)

La producción de hidrógeno suele clasificarse según la materia prima, la tecnología y la fuente de energía empleadas. Para diferenciar su origen y el impacto ambiental asociado a cada proceso, se utiliza un sistema de colores, como se muestra en la **Figura 2**.

Figura 2

Tipos de hidrógeno según su método de producción



Nota. Obtenido de Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico (s.f) Sitio web del hidrógeno.

2.1 Hidrógeno verde

El hidrógeno verde se produce principalmente mediante la electrólisis del agua, donde una corriente eléctrica separa el hidrógeno y el oxígeno utilizando electrodos. Cuando la energía empleada proviene de fuentes renovables, como la solar o la eólica, se obtiene un combustible con una huella de carbono muy baja, considerado una alternativa para reemplazar los combustibles fósiles y favorecer la transición energética. Además, ofrece buenas condiciones para su almacenamiento y transporte.

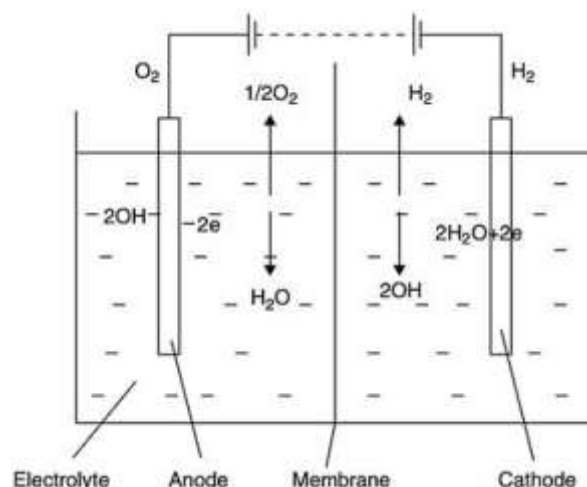
2.2 Producción de hidrógeno verde

2.2.1 Electrólisis.

La electrólisis es un proceso electroquímico que utiliza energía eléctrica para separar las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno. Este proceso ocurre en una celda electrolítica con dos electrodos conectados a una fuente de corriente continua, donde se desarrollan reacciones de oxidación y reducción que generan ambos gases. Cuando la electricidad utilizada procede de fuentes renovables, la electrólisis representa una de las principales tecnologías para la producción de hidrógeno verde (Lackner et al.,2022). La **Figura 3** muestra el funcionamiento general de una celda de electrólisis.

Figura 3

Esquema típico de un proceso de electrólisis



Nota. Obtenido de Lackner et al. (2022).

En general hay varias configuraciones de electrolizadores para producir hidrógeno, las 3 principales tecnologías de interés para aplicaciones industriales son los electrolizadores alcalinos, electrolizadores PEM y electrolizadores SOEC.

Electrolizadores alcalinos: Son los electrolizadores que utilizan una solución alcalina como electrolito, que se compone generalmente de hidróxido de potasio KOH con un porcentaje en peso (20-40%), hidróxido de sodio NaOH y cloruro de sodio NaCl (Anand et al.,2025). Posee una membrana de separación permeable fabricada de materiales de amianto con un espesor de 3 mm, debido a esto la temperatura de operación no debe superar los 80°C, en el cátodo se generan hidrogeno e hidróxido, luego el hidróxido se mueve a la parte del ánodo generando oxígeno, las semirreacciones que ocurren se muestran a continuación:

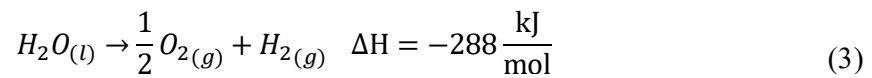
Cátodo:



Ánodo:



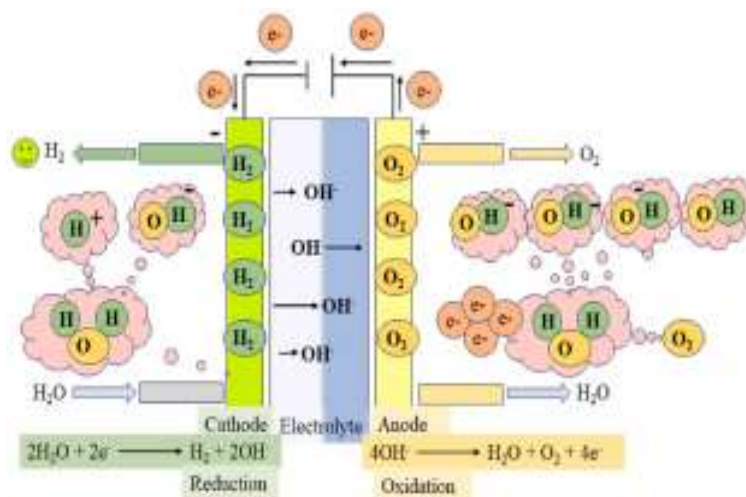
Reacción general:



La **Figura 4** muestra el esquema de un electrolizador alcalino.

Figura 4

Funcionamiento de un electrolizador alcalino



Nota. Obtenido de Anand et al. (2025).

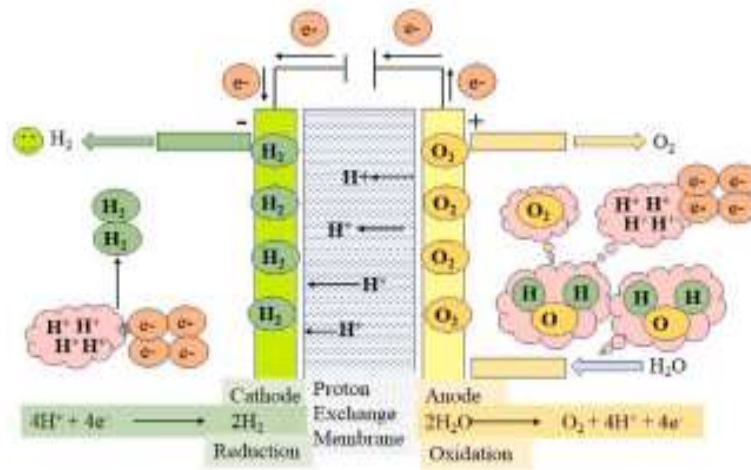
Sin embargo, el hidrógeno obtenido no alcanza una pureza alta y, además, los equipos no son muy flexibles en su operación (Iberdrola, 2024). Aunque en los últimos años ha habido mejoras, como la minimización del espacio entre los electrodos que permite trabajar con mayor densidad de corriente, y el desarrollo de materiales electrocatalíticos avanzados para disminuir la sobretensión (Lackner et al., 2022).

Electrolizadores PEM: Los electrolizadores de membrana de intercambio de protones (PEM) son dispositivos que utilizan una membrana polimérica sólida, lo cual actúa como electrolito y permite el transporte selectivo de protones. Durante la electrólisis, la molécula de agua se separa en hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2); posteriormente, los protones migran a través de la membrana y se reducen en el cátodo para formar hidrógeno gaseoso.

Entre sus principales ventajas se encuentran la alta pureza del hidrógeno producido (hasta 99,9%), densidades de corriente superiores a 1.600 mA/cm^2 y eficiencias entre el 55 y el 70%. Sin embargo, su implementación presenta altos costos debido al uso de metales nobles como platino, iridio, rutenio y rodio, además de membranas comerciales como Nafión, utilizadas para la conducción de protones y la separación de gases (Iberdrola.,2024). La **Figura 5** representa el esquema general de este tipo de electrolizadores.

Figura 5

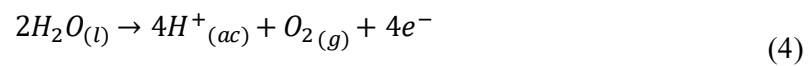
Funcionamiento de un electrolizador PEM.



Nota. Obtenido de Anand et al. (2025)

A continuación, se muestran las semirreacciones producidas:

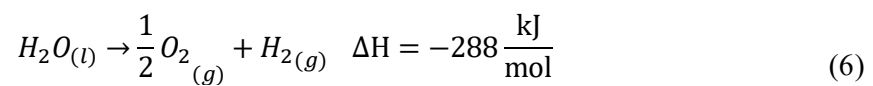
Ánodo:



Cátodo:



Ecuación general:

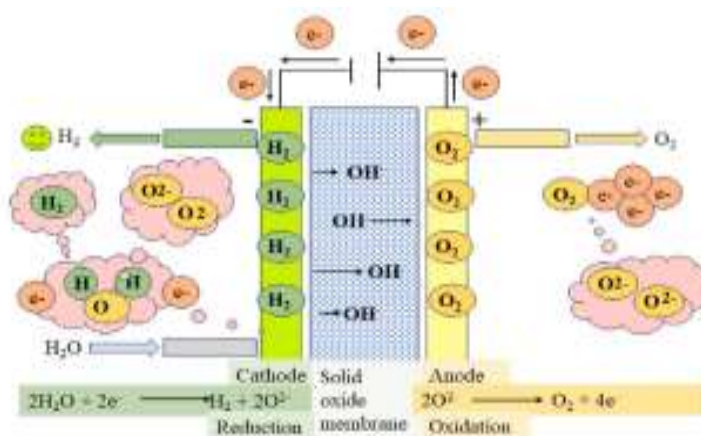


Electrolizadores SOEC: Los electrolizadores de óxido sólido (SOEC), también conocidos como electrolizadores de alta temperatura o de vapor, operan entre 700 y 1000 °C utilizando electrolitos cerámicos sólidos. Esta tecnología emplea densidades de corriente superiores a 1000 mA/cm² y voltajes cercanos a 1,3 V. Durante su funcionamiento, los electrones suministrados por el circuito externo reaccionan con el agua en el cátodo para producir hidrógeno (H₂) y especies iónicas que atraviesan el electrolito (Lackner et al., 2022).

Aunque su desarrollo industrial aún es menor en comparación con las tecnologías alcalina y PEM, los SOEC presentan ventajas como la ausencia de electrolitos líquidos corrosivos y la posibilidad de aprovechar fuentes de calor disponibles, lo que les confiere un importante potencial para futuras aplicaciones (Dawood et al., 2020). El esquema típico de un electrolizador de óxido sólido (SOEC) se muestra en la **Figura 6**.

Figura 6

Funcionamiento de un electrolizador SOEC



Nota. Obtenido de Anand et al. (2025).

2.2.2 Procesos termoquímicos.

Es la generación de hidrógeno mediante el uso de energía térmica para dividir las moléculas del agua, tiene gran potencial para su producción a gran escala, especialmente al combinarse con fuentes de energía renovables o nucleares (Dawood et al., 2020).

Las reacciones se producen a altas temperaturas, entre los 500°C-1200°C, con el fin de facilitar la división del agua, se basa en ciclos termoquímicos como el azufre- yodo (S-I), el ciclo azufre. híbrido y el ciclo cloro-cloro (Cl-Cl). En la producción térmica de hidrógeno se destacan 3 métodos: gasificación, pirólisis y reformado con vapor, teniendo como principal enfoque la descomposición de biomasa (Buttler y Spliethoff, 2018).

Gasificación

Implica el calentamiento de la biomasa con oxígeno y vapor a temperaturas superiores a 700°C, que genera gas de síntesis (syngas), una mezcla de H₂, CO y CO₂, este gas se somete a un proceso adicional, como la reacción de desplazamiento agua- gas que mejora el rendimiento de hidrógeno seguido de una purificación por medio de membranas (Anand et al., 2025).

Pirólisis

Implica el calentamiento de biomasa en ausencia de oxígeno, lo cual es importante para producir gases como H₂, CO y CO₂, usado comúnmente para producir materia orgánica en combustible (Buttler & Spliethoff, 2018).

Reformado con vapor

Consiste en la reacción de compuestos derivados de la biomasa, como bioetanol, bioaceites o gases de pirólisis con vapor de agua a altas temperaturas, entre 600-900°C en presencia de un catalizador como Ni, Co u otros materiales como Al₂O₃ (Dawood et al., 2020).

2.2.3 Métodos biológicos

Los métodos biológicos para producir hidrógeno aprovechan la capacidad metabólica de microorganismos como bacterias, algas y cianobacterias para generar hidrógeno mediante procesos como la biofotólisis, la fermentación y la electrólisis microbiana. Aunque estas tecnologías aún se encuentran en etapas de desarrollo, representan alternativas sostenibles debido a sus bajas condiciones de operación y al uso potencial de recursos renovables (Dawood et al., 2020).

Biofotólisis

Implica el uso de organismos foto autotróficos como microalgas verdes y cianobacterias para separar la molécula de agua por medio de la luz solar, puede ser directa, lo cual utiliza reacciones impulsadas por la luz, facilitadas por enzimas hidrogenasas o indirecta que divide el agua en dos etapas, fotosíntesis y fermentación (Anand et al., 2025).

Fermentación

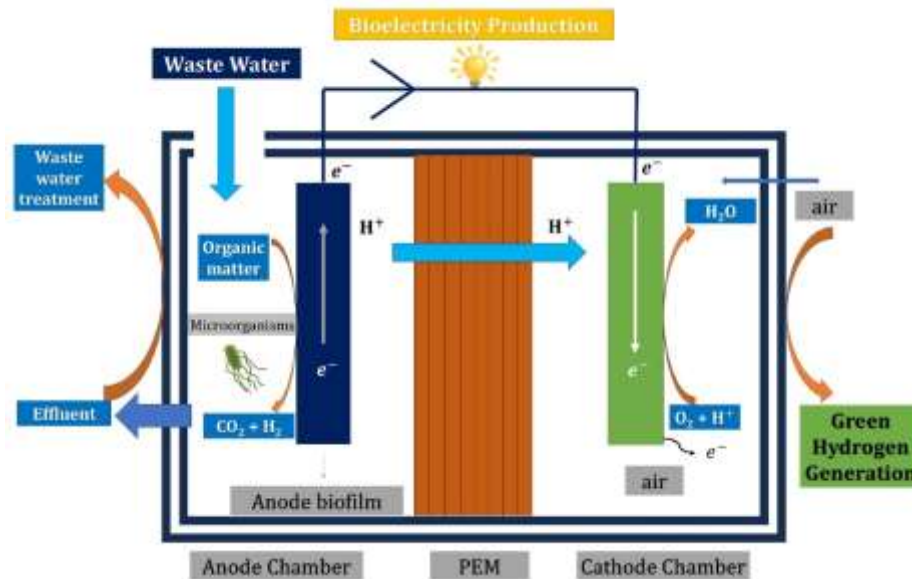
Implica que las bacterias anaeróbicas metabolizan sustratos orgánicos como glucosa, sacarosa o almidón para producir hidrógeno, los hay de dos tipos, la fermentación oscura que produce el gas en ausencia de luz y la foto fermentación emplea bacterias purpuras no sulfurosas que utilizan la luz para convertir ácidos orgánicos en H_2 (Anand et al., 2025).

Pilas de combustible microbianas

Es una tecnología en desarrollo que utiliza la actividad metabólica microbiana y permite transformar la materia orgánica en electricidad, los microbios se ubican en el ánodo, descomponen materia orgánica y liberan electrones, los cuales fluyen hasta el cátodo mediante un circuito externo generando corriente (Nawaz et al., 2022), así como se observa en la **Figura 7**

Figura 7

Esquema de una pila de combustible microbiana



Nota. Obtenido de Anand et al. (2025).

3. Análisis de resultados

El análisis de los estudios seleccionados permitió identificar los principales materiales utilizados en la producción de hidrógeno verde y reconocer los desafíos tecnológicos asociados a su aplicación. A partir de la información recopilada, se sintetizan los avances reportados en las rutas de electrólisis, procesos termoquímicos y métodos biológicos, así como las principales limitaciones relacionadas con el desempeño, la estabilidad y la implementación de los materiales estudiados.

3.1 Materiales utilizados en los procesos de producción de hidrógeno verde

Se realizó una revisión de la literatura científica reciente. Los estudios seleccionados permitieron reconocer los materiales empleados en las rutas de electrólisis, procesos termoquímicos y métodos biológicos, así como sus propiedades, aplicaciones, ventajas y limitaciones reportadas. A partir de esta información se estableció una clasificación de los materiales según la tecnología de producción empleada, permitiendo identificar las principales tendencias de investigación y los desarrollos más relevantes en cada área.

3.1.1 Electrólisis

La electrólisis constituyó la principal tecnología y concentró la mayor cantidad de investigaciones identificadas durante la revisión documental. Los estudios evaluaron materiales como metales nobles, metales de transición, fosfuros, sulfuros, carburos, materiales derivados de MOFs, polímeros conductores y materiales carbonosos, con el propósito de mejorar las reacciones de evolución de hidrógeno (HER) y oxígeno (OER), así como reducir la dependencia de metales críticos como platino (Pt), rutenio (Ru) e iridio (Ir). Los materiales identificados y sus principales hallazgos se presentan en la **Tabla 2**.

Tabla 2

Materiales reportados en procesos de electrólisis para la producción de hidrógeno verde.

Autor	Año	Material de estudio	Principales hallazgos
Sankar et al.	2021	Fe-ZIF-67	Nanofibras de Fe-ZIF-67 usadas como ánodo en medio alcalino; mostraron estabilidad y eficiencia a 1,68 V y 10 mA/cm ² .
Riyajuddin et al.	2021	Ni ₂ P-CuP ₂	Fosfuro bimetálico sobre Ni-foam/grafeno/CNT; presentó bajos sobrepotenciales y estabilidad prolongada.

Autor	Año	Material de estudio	Principales hallazgos
Chen et al.	2020	Pt-TiO ₂ -Mo	Electrocatalizador de baja carga de Pt soportado en TiO ₂ dopado con Mo; mejoró actividad y resistencia a corrosión.
Niu et al.	2021	RuO ₂ /(Co,Mn) ₃ O ₄	Catalizador con baja carga de Ru; la incorporación de Mn moduló la estructura electrónica y favoreció la OER en ácido.
Kampouri et al.	2021	MIL-125/UIO-66(NH ₂) UIO-66(NH ₂)	Heterouniones MOF/MOF que mejoraron la separación de cargas y el rendimiento fotocatalítico para producción de H ₂ .
Gu et al.	2021	PANI/CD	Catalizador bifuncional libre de metales; permitió producción de H ₂ en electrolito neutro y agua de mar.
Ge et al.	2021	CoNi/ α -MoC	Catalizadores bimetalicos CoNi sobre carburo de molibdeno; superaron el desempeño de Pt/C comercial.
Jia et al.	2020	TiO ₂ /Bi ₂ S ₃ -BiOBr	Nanohojas sobre TiO ₂ NTA; la microestructura influyó en la actividad fotocatalítica y generación de H ₂ .
Rasouli et al.	2020	TiO ₂ -RuO ₂ -Ta ₂ O ₅	Fotoelectrodos con óxidos mixtos y PPy-NrGO; alcanzaron 43,68 % para HER y 17,51 % para OER.
Zhao et al.	2021	ZnCo ₂ O ₄ /PPy	Nanocables de ZnCo ₂ O ₄ anclados con PPy; mejoraron la actividad bifuncional HER/OER.
Sharma et al.	2021	Bi ₂ S ₃ /PANI	Heterounión 3D tipo nanoflor; aumentó la densidad de fotocorriente frente a Bi ₂ S ₃ puro.
El-Bery et al.	2021	TiO ₂ /PANI, PPy, PEDOT	Polímeros conductores sobre TiO ₂ ; redujeron la banda prohibida óptica y mejoraron la actividad HER.
Xie et al.	2021	CoNi-MOF/CNT	Nanocompuestos derivados de MOF con CNT dopados con N; funcionaron como electrocatalizadores trifuncionales.
Hao et al.	2021	FeNi-B	Nanoláminas Fe-Ni dopadas con B; mostraron baja demanda energética y buen desempeño bifuncional.
Hatami et al.	2021	Fe	Micro/nanoestructuras de Fe tipo erizo; evaluadas como electrocatalizadores HER/OER en KOH 1M.
Shen et al.	2020	FeNi/CNT	Compuestos FeNi-CNT bifuncionales; destacaron por estabilidad y potencial de materiales carbonosos.
Dai et al.	2021	Co/CoO	Co/CoO sobre carbono dopado con N; mostró mayor actividad catalítica y menor sobrepotencial.
Baby et al.	2020	Fe, Co, Ni, Cu	Catalizadores de átomo único en grafeno dopado con N; evaluaron estabilidad y energía de adsorción.
Shen et al.	2021	Ni ₃ C@Ni/g-C ₃ N ₄	Cocatalizador núcleo-cáscara; el espesor de Ni mejoró la producción fotocatalítica de H ₂ .

Autor	Año	Material de estudio	Principales hallazgos
Shi et al.	2021	CoP@FeCoP	Fosfuros CoP y FeCoP sobre carbono dopado con N; alta actividad HER/OER en medio alcalino.
Liu et al.	2021	MoS ₂ /g-C ₃ N ₄	MoS ₂ ultradelgado sobre g-C ₃ N ₄ poroso; mejoró la separación de carga y exposición de sitios activos.
Zhuge et al.	2021	MoS ₂ /CdS	Fotodeposición de MoS ₂ sobre CdS; incrementó la evolución fotocatalítica de H ₂ .
Samaniego-Benítez et al.	2021	ZnS/MoS ₂	Compuesto solvotérmico ZnS/MoS ₂ ; presentó mayor actividad HER que los materiales individuales.
Wang et al.	2021	NiS/g-C ₃ N ₄	NiS como cocatalizador sobre g-C ₃ N ₄ favoreció la evolución fotocatalítica de H ₂ .
Ahmad et al.	2024	Co-Fe ₂ O ₃	Óxidos de hierro dopados con Co; mostraron estabilidad y buen desempeño electro/fotocatalítico.
Nayana y Sunitha	2021	MoS ₂	MoS ₂ nanoestructurado; candidato prometedor para HER activada por luz y por vía electroquímica.
Rekha et al.	2021	Fosfatos de Co	Fosfatos de cobalto; favorecen transferencia electrónica, adsorción y disociación del agua.
Kim et al.	2022	WO ₃ /g-C ₃ N ₄ -Ni	Catalizador bifuncional para electrólisis fotoasistida de urea; requiere menor energía que la electrólisis convencional.
Hota et al.	2023	Cu, Pt, Ag, TiO ₂	Revisión de fotocatalizadores y electrocatalizadores metálicos y libres de metales para división del agua.
Adak et al.	2023	Zr-ZnTiO ₃	ZnTiO ₃ modificado con Zr; mostró buen desempeño en HER y OER.
Vijayakumar,et al.	2024	Ni-ZIF/CN	Ni-ZIF incorporado en g-C ₃ N ₄ ; mejoró el rendimiento HER/OER frente a Ni-ZIF convencional.

Nota. Elaboración propia.

Los resultados mostraron una tendencia hacia el desarrollo de materiales basados en elementos abundantes como hierro (Fe), níquel (Ni) y cobalto (Co), con el propósito de reducir la dependencia de metales críticos como platino (Pt), rutenio (Ru) e iridio (Ir). Materiales como FeNi-B, CoNi/ α -MoC, CoP@FeCoP y Ni₂P-CuP₂ reportaron desempeños competitivos para HER y OER, evidenciando su potencial para aplicaciones de electrólisis a gran escala.

Asimismo, gran parte de las investigaciones se enfocaron en estrategias como dopaje, formación de heteroestructuras, nanoarquitecturas jerárquicas e incorporación de soportes conductores, las cuales permitieron incrementar los sitios activos, mejorar la transferencia electrónica y reducir los sobrepotenciales requeridos para las reacciones electroquímicas.

Respecto a lo anterior, los estudios permitieron identificar cinco líneas principales de desarrollo: óxidos metálicos dopados y soportes optimizados; fosfuros y nanoarquitecturas jerárquicas; heteroestructuras híbridas y sistemas núcleo-cáscara; polímeros conductores y materiales libres de metales nobles; y materiales derivados de MOFs y catalizadores de átomo único (SACs). Estas estrategias buscaron combinar eficiencia, estabilidad y viabilidad económica para favorecer la implementación sostenible de tecnologías de electrólisis.

3.1.1.1 Metales nobles.

Los metales nobles constituyeron los materiales de referencia para las reacciones de evolución de hidrógeno (HER) y evolución de oxígeno (OER) debido a su elevada actividad electrocatalítica y bajos sobrepotenciales. Entre los materiales identificados destacaron catalizadores basados en platino (Pt) y rutenio (Ru), empleados de forma individual o combinados con óxidos metálicos y soportes avanzados.

Los sistemas Pt–TiO₂–Mo presentaron actividades aproximadamente 4,4 veces superiores a las del catalizador comercial Pt/C, comportamiento atribuido a la modulación electrónica inducida por el molibdeno, que favoreció la transferencia electrónica y la resistencia a la corrosión (Chen et al., 2020)

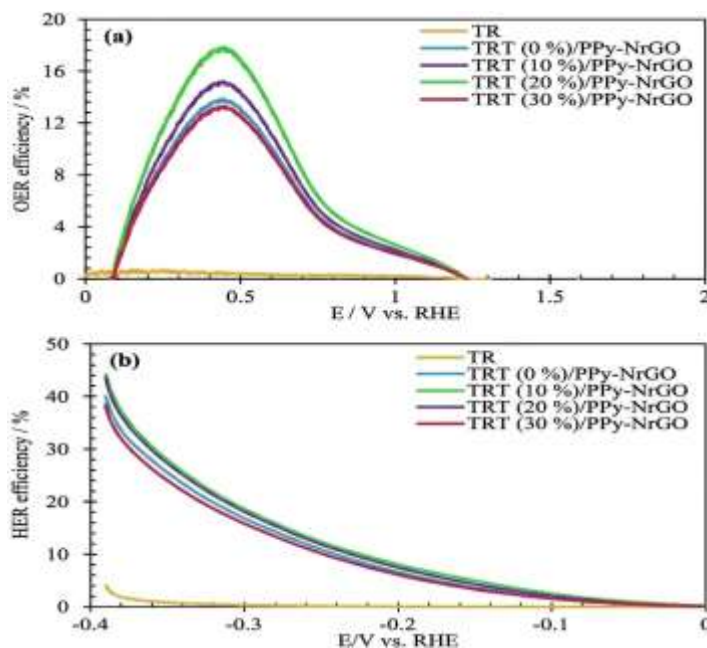
De manera similar, los nanocompuestos RuO₂/(Co,Mn)₃O₄ con baja carga de Ru mejoraron la OER en medio ácido gracias a las modificaciones electrónicas generadas por la

incorporación de Mn, evidenciando que es posible reducir el contenido de rutenio sin afectar significativamente el desempeño electroquímico (Niu et al., 2021).

Asimismo, los fotoelectrodos $\text{TiO}_2\text{--RuO}_2$ – soportados sobre polipirrol y grafeno dopado con nitrógeno alcanzaron eficiencias de 43,68 % para HER y 17,51 % para OER, asociadas a una menor resistencia a la transferencia de carga y mayor densidad de portadores (Rasouli et al., 2020). Los resultados obtenidos para ambas reacciones se presentan en la **Figura 8**.

Figura 8

Eficiencia de las reacciones OER (A) y HER (B) en función del potencial aplicado.



Nota. Adaptado de Rasouli et al. (2020).

Los materiales basados en Pt y Ru presentaron algunos de los mejores desempeños en electrólisis; sin embargo, su alto costo y escasez impulsaron el desarrollo de soportes avanzados y estructuras híbridas orientadas a reducir su contenido sin comprometer la actividad catalítica.

3.1.1.2 Metales de transición.

Los metales de transición fueron ampliamente estudiados para la producción de hidrógeno mediante electrólisis debido a su abundancia, bajo costo y estabilidad electroquímica.

Entre los

materiales evaluados destacaron sistemas basados en hierro (Fe), níquel (Ni) y cobalto (Co), propuestos como alternativas a metales nobles para HER y OER.

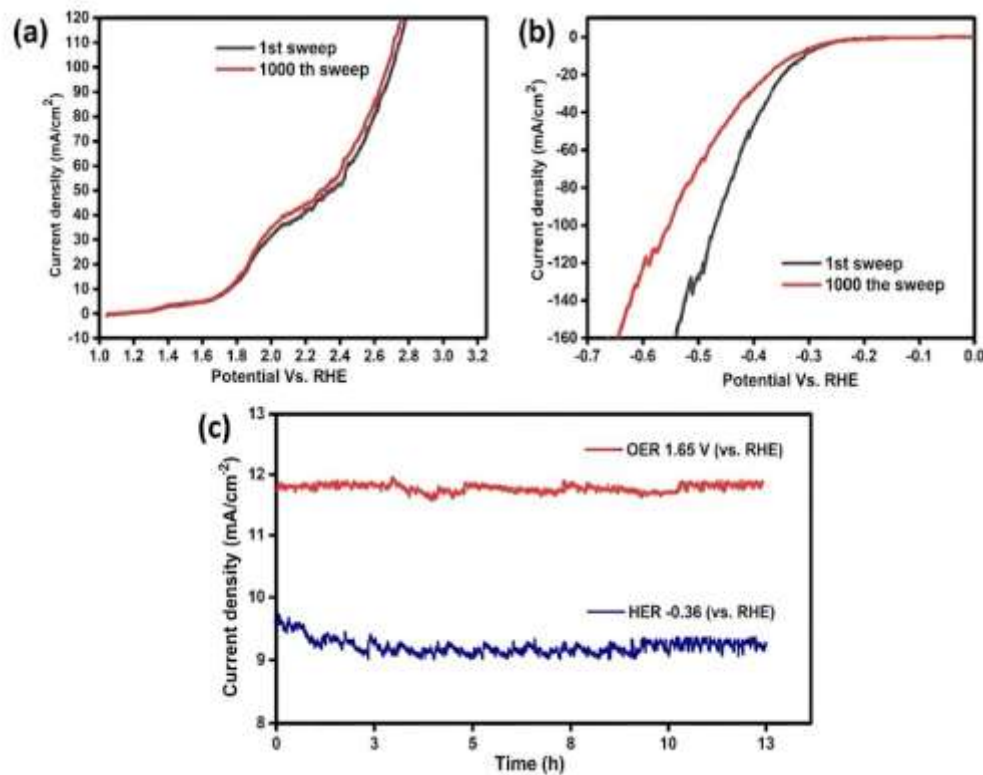
Los sistemas basados en Fe y Ni mostraron resultados favorables. Fe-ZIF-67 alcanzó densidades de corriente de $10 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ a 1,68 V, mientras que las nanoestructuras FeNi-B reportaron sobrepotenciales de 50 mV para HER y 171 mV para OER, manteniendo estabilidad durante tres días de operación continua (Sankar et al., 2021; Hao et al., 2021) véase **Apéndice A**

Los materiales basados en Co también presentaron desempeños destacados. Los sistemas CoNi derivados de MOFs y los catalizadores CoNi/ α -MoC mejoraron la transferencia electrónica y la disponibilidad de sitios activos, llegando incluso a superar al catalizador comercial Pt/C para HER (Xie et al., 2021; Ge et al., 2021).

Los materiales basados en Co-Fe₂O₃ alcanzaron potenciales de 1,63 V para la OER y -0,23 V para la HER, además de una producción fotocatalítica de hidrógeno de 97,77 $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. Los ensayos de estabilidad realizados durante 1000 ciclos mostraron una baja pérdida de desempeño, confirmando su potencial para aplicaciones prolongadas. Los resultados de HER, OER y estabilidad del sistema se presentan en la **Figura 9**

Figura 9

Comportamiento electroquímico, curvas de polarización OER/HER y estabilidad a largo plazo del sistema Co-Fe₂O₃.



Nota. Adaptado de Ahmad et al. (2024).

Los perovskitas de ZnTiO₃ dopadas con circonio (Zr) obtuvieron sobrepotenciales de 165 mV para la HER y 335 mV para la OER en medio alcalino, manteniendo estabilidad durante 12 horas de operación (Adak et al., 2023)

Los materiales basados en Fe, Ni y Co constituyeron alternativas prometedoras a los metales nobles debido a su abundancia, menor costo y buena estabilidad operativa. Estrategias como dopaje, aleaciones bimetalicas y soportes carbonosos permitieron mejorar significativamente su desempeño electroquímico.

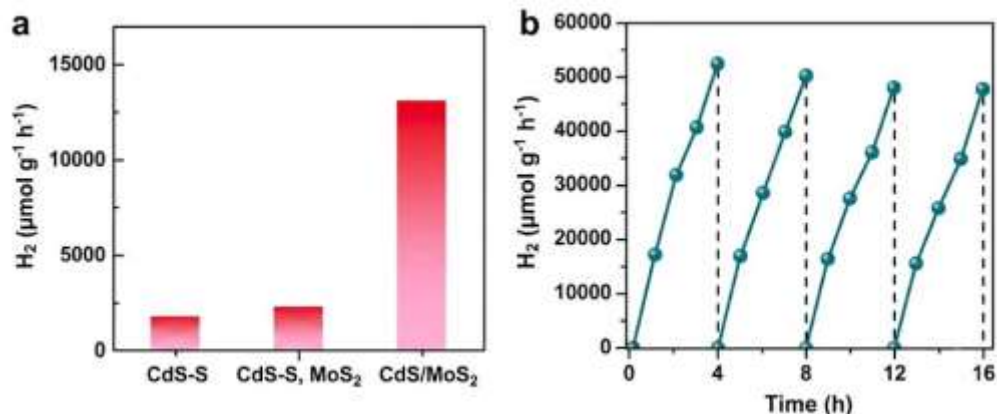
3.1.1.3 Sulfuros, fosfuros y carburos.

Los sulfuros, fosfuros y carburos constituyeron materiales prometedores para sustituir parcial o totalmente a los catalizadores basados en Pt en electrólisis, debido a su combinación de actividad electrocatalítica, estabilidad y menor costo para las reacciones de evolución de hidrógeno (HER) y evolución de oxígeno (OER).

Dentro de los sulfuros, el disulfuro de molibdeno (MoS_2) fue uno de los materiales más estudiados debido a su adsorción y evolución de hidrógeno. Los sistemas basados en MoS_2 soportados sobre g- C_3N_4 poroso alcanzaron tasas de producción de $3570 \mu\text{mol}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ y rendimientos cuánticos aparentes de 8,8 % a 420 nm gracias a una mejor separación de cargas y exposición de sitios activos (Liu et al., 2021). Las heteroestructuras CdS/MoS_2 y ZnS/MoS_2 mejoraron la actividad HER respecto a sus componentes individuales (Zhuge et al., 2021; Samaniego-Benítez et al., 2021). Los resultados obtenidos para la heteroestructura CdS/MoS_2 se presentan en la **Figura 10**.

Figura 10

Producción fotocatalítica de hidrógeno y estabilidad del sistema CdS/MoS₂: (A) velocidad de evolución de H₂ y (B) estabilidad durante ciclos fotocatalíticos.



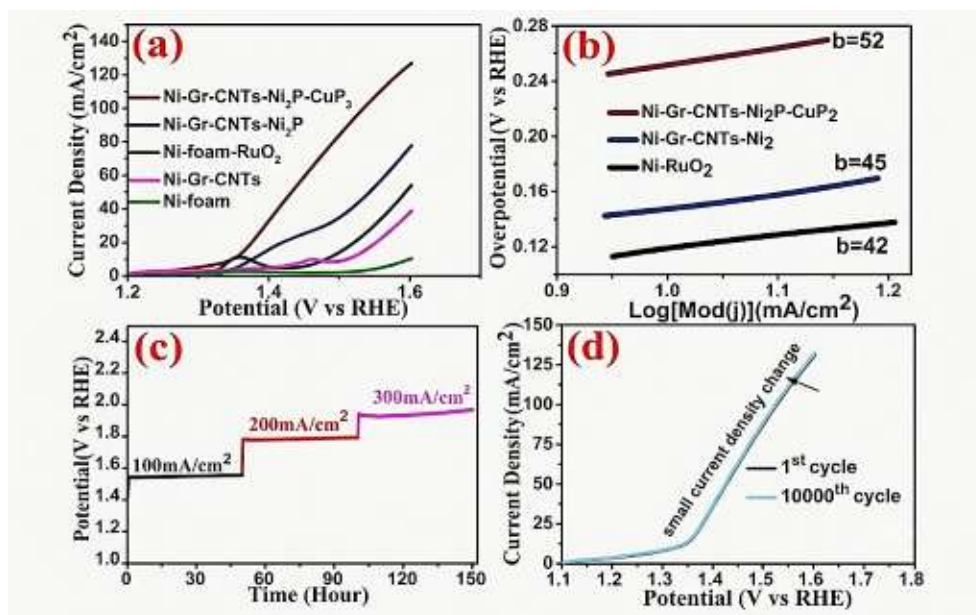
Nota. Adaptado de Zhuge et al. (2021).

Asimismo, el uso de NiS como cocatalizador sobre g-C₃N₄ favoreció la evolución fotocatalítica de hidrógeno gracias a una mayor eficiencia en la transferencia electrónica (Wang et al., 2021).

Los fosfuros de metales de transición presentaron algunos de los mejores desempeños electroquímicos reportados en la revisión. Las arquitecturas jerárquicas de Ni₂P-CuP₂ soportadas sobre espumas de níquel modificadas con grafeno y nanotubos de carbono alcanzaron sobrepotenciales de 12 mV para HER y 140 mV para OER, además de operar durante diez días manteniendo densidades de corriente elevadas. Los resultados experimentales obtenidos para este sistema se presentan en la **Figura 11**.

Figura 11

Desempeño electroquímico y estabilidad del sistema $\text{Ni}_2\text{P-CuP}_2$: (A) curvas LSV, (B) pendientes de Tafel, (C) estabilidad a largo plazo y (D) comparación antes y después de 10 000 ciclos.



Nota. Adaptado de Riyajuddin et al. (2021).

De forma similar, los sistemas CoP@FeCoP derivados de estructuras metal-orgánicas exhibieron sobrepotenciales de 141 mV para HER y 238 mV para OER, además de requerir únicamente 1,68 V para alcanzar densidades de corriente de $10 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ en electrólisis global del agua. Estos resultados evidenciaron el efecto favorable de las heteroestructuras fosforadas para incrementar la actividad bifuncional y mejorar la cinética de reacción (Shi et al., 2021)

Véase **Apéndice B**

En cuanto a los carburos, los materiales $\text{CoNi}/\alpha\text{-MoC}$ y $\text{Ni}_3\text{C}@\text{Ni}$ favorecieron la transferencia electrónica y la estabilidad del sistema. Los catalizadores $\text{CoNi}/\alpha\text{-MoC}$ superaron el desempeño del Pt/C comercial para HER (Ge et al., 2021), mientras que las estructuras núcleo-cáscara $\text{Ni}_3\text{C}@\text{Ni}$ incrementaron la producción fotocatalítica de hidrógeno mediante una mayor separación de cargas (Shen et al., 2021).

Los sulfuros, fosfuros y carburos constituyeron alternativas prometedoras a los metales nobles. Los fosfuros destacaron por sus bajos sobrepotenciales y elevada estabilidad, mientras que los sulfuros y carburos favorecieron la transferencia de carga y la disponibilidad de sitios activos.

3.1.1.4 MOFs y materiales derivados

Los materiales derivados de estructuras metal-orgánicas (MOFs) despertaron gran interés para la producción de hidrógeno debido a su elevada área superficial, abundancia de sitios activos y versatilidad estructural. Estas características favorecieron el desempeño catalítico en procesos de electrólisis y fotocálisis. Entre los materiales evaluados destacaron las nanofibras de Fe-ZIF-67, las cuales alcanzaron densidades de corriente de $10 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ a 1,68 V y mostraron una adecuada estabilidad operativa en electrólisis alcalina, evidenciando el potencial de los MOFs basados en hierro para aplicaciones de disociación del agua (Sankar et al., 2021).

Asimismo, las heterouniones MOF/MOF formadas por MIL-125 y UIO-66(NH_2) mejoraron la producción fotocatalítica de hidrógeno al favorecer la separación de cargas fotoinducidas y disminuir la recombinación electrón-hueco (Kampouri et al., 2021).

De manera similar, los materiales Ni-ZIF incorporados en matrices de $\text{g-C}_3\text{N}_4$ mostraron un mejor desempeño para las reacciones HER y OER respecto a los sistemas Ni-ZIF

convencionales, debido al aumento de sitios activos y a una transferencia electrónica más eficiente (Vijayakumar et al., 2024).

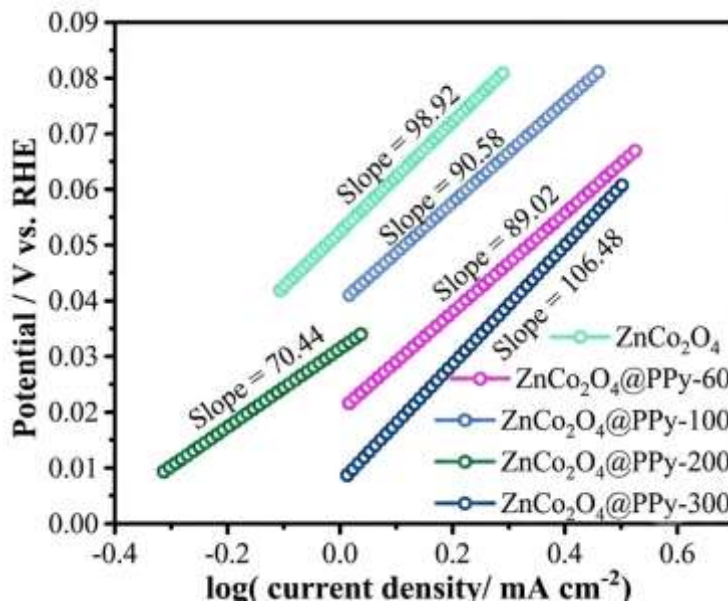
3.1.1.5 Polímeros conductores y materiales carbonosos

Los polímeros conductores y materiales carbonosos fueron utilizados para mejorar el desempeño de los sistemas de electrólisis debido a su elevada conductividad eléctrica y capacidad de transferencia electrónica. Entre los materiales identificados destacaron polianilina (PANI), polipirrol (PPy), nanotubos de carbono (CNT), grafeno dopado con nitrógeno y nitruro de carbono grafitico (g-C₃N₄).

Dentro de los polímeros conductores, los sistemas basados en PANI y PPy mostraron mejoras significativas en los procesos de evolución de hidrógeno. El compuesto PANI/CD, formado por polianilina y puntos de carbono, permitió desarrollar un fotoelectrocatalizador bifuncional libre de metales para producir hidrógeno en electrolitos neutros y agua de mar, constituyendo una alternativa a los catalizadores basados en metales nobles (Gu et al., 2021). Los nanocompuestos ZnCo₂O₄/PPy mejoraron las reacciones HER y OER gracias al efecto sinérgico entre el polímero conductor y la estructura nanoestructurada del óxido metálico (Zhao et al., 2021) véase **figura 12**

Figura 12

Curvas de Tafel para la reacción de evolución de oxígeno (OER) en sistemas $\text{ZnCo}_2\text{O}_4/\text{PPy}$ con diferentes condiciones de síntesis.



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

Asimismo, la incorporación de polímeros conductores sobre TiO_2 permitió reducir la banda prohibida óptica y mejorar la actividad fotocatalítica para la producción de hidrógeno. Los sistemas basados en PANI, PPy y PEDOT favorecieron la absorción de luz visible y transferencia de carga respecto al TiO_2 sin modificar (El-Bery et al., 2021). De manera complementaria, las heterouniones $\text{Bi}_2\text{S}_3/\text{PANI}$ incrementaron la densidad de fotocorriente frente al Bi_2S_3 puro, confirmando el efecto favorable de los polímeros conductores en procesos fotoelectrocatalíticos (Sharma et al., 2021)

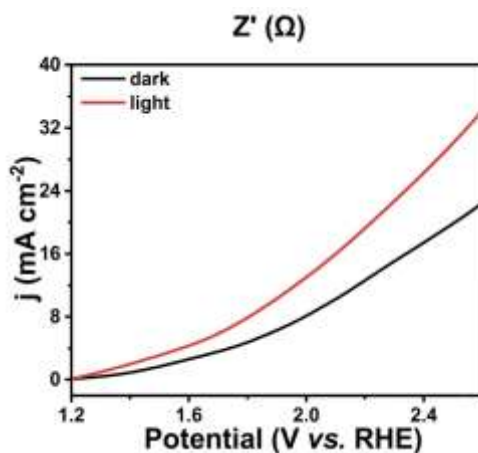
Por otra parte, los materiales carbonosos actuaron como soportes conductores de gran relevancia. Los compuestos FeNi/CNT mostraron elevada estabilidad y actividad bifuncional para la disociación del agua, mientras que los nanocompuestos CoNi derivados de MOFs

recubiertos con nanotubos de carbono dopados con nitrógeno mejoraron la transferencia electrónica y la actividad catalítica (Shen et al., 2020; Xie et al., 2021). Asimismo, los catalizadores de átomo único soportados sobre grafeno dopado con nitrógeno evidenciaron el potencial de estas estructuras para estabilizar metales de transición y mejorar su desempeño catalítico (Baby et al., 2020).

La sinergia de los polímeros conductores con los materiales carbonosos permitió desarrollar sistemas fotoelectrocatalíticos con mejor respuesta bajo iluminación. El comportamiento del sistema PANI/CD se presenta en la **Figura 13**, donde se observa un incremento de la densidad de corriente bajo irradiación luminosa respecto a condiciones oscuras.

Figura 13

Comparación de las curvas LSV del sistema PANI/CD para electrólisis asistida por luz en condiciones de oscuridad e iluminación.



Nota. Adaptado de Gu et al. (2021).

Los polímeros conductores y materiales carbonosos mejoraron la conductividad, estabilidad y actividad catalítica de los sistemas de electrólisis. Su capacidad para reducir la dependencia de metales nobles los posicionó como materiales estratégicos para tecnologías más eficientes y económicamente viables.

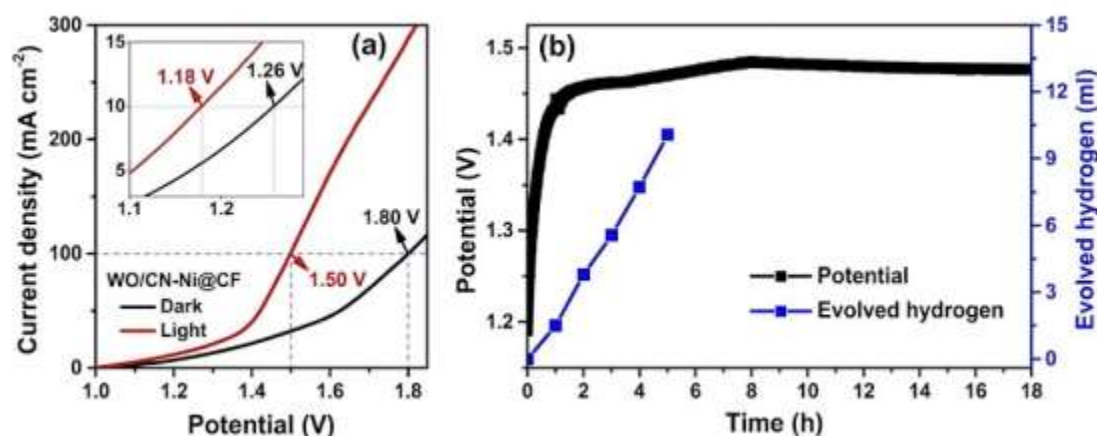
3.1.1.6 Estrategias emergentes: catalizadores de átomo único y sustitución de la OER.

Los catalizadores de átomo único (SACs) surgieron como una estrategia prometedora para maximizar la eficiencia atómica. Los sistemas basados en átomos individuales de Fe, Co, Ni y Cu anclados sobre grafeno dopado con nitrógeno mostraron energías libres de adsorción de hidrógeno cercanas a los valores termodinámicamente óptimos para HER, evidenciando su potencial para reducir el uso de metales y mejorar la actividad catalítica (Baby et al., 2020).

Otra estrategia emergente consistió en sustituir la reacción de evolución de oxígeno (OER) por reacciones de oxidación más favorables desde el punto de vista energético. En este contexto, los sistemas $\text{WO}_3/\text{g-C}_3\text{N}_4\|\text{Ni}$ empleados para la oxidación de urea (UOR) redujeron el voltaje de operación de la celda de 1,80 V a 1,50 V bajo iluminación, disminuyendo significativamente el requerimiento energético de la electrólisis convencional (Kim et al., 2022). Los resultados obtenidos para este sistema se presentan en la Figura 14.

Figura 14

Desempeño fotoelectroquímico del sistema $WO_3/g-C_3N_4||Ni$: (A) curvas LSV y (B) estabilidad y evolución de H_2 .



Nota. Adaptado de Kim et al. (2022)

Los catalizadores de átomo único y la sustitución de la OER representaron estrategias emergentes para incrementar la eficiencia y sostenibilidad de la producción de hidrógeno verde.

3.1.2 Procesos termoquímicos

Los procesos termoquímicos constituyeron una mediante el aprovechamiento de energía térmica y solar. Los estudios revisados evaluaron principalmente óxidos metálicos, perovskitas y catalizadores basados en níquel, orientados a mejorar la estabilidad térmica, el intercambio de oxígeno y la eficiencia de los procesos de reformado y división termoquímica del agua.

Asimismo, se identificaron materiales fotoactivos y estrategias derivadas de biomasa para optimizar la generación sostenible de hidrógeno. Los materiales identificados y sus principales hallazgos se muestran en la **Tabla 3**.

Tabla 3

Materiales reportados en procesos termoquímicos para la producción de hidrógeno verde.

Autor	Año	Material de estudio	Principales hallazgos
Nassereddine et al.	2021	Óxidos de Zn, Fe, Ni, Sr, Nb y Sn	Evaluaron diferentes óxidos metálicos y sistemas tipo espinela para identificar materiales con potencial para ciclos termoquímicos de producción de H ₂ .
McCord et al.	2024	(La _{0.6} Sr _{0.4}) _{0.95} Mn _{0.8} Ga _{0.2} O _{3-δ}	Perovskita con elevada capacidad de intercambio de oxígeno y estabilidad durante ciclos redox termoquímicos.
Yığiter Pişkin	y 2022	La _{1-x} Ca _x Mn _{0.8} Co _{0.2} O ₃	El dopaje con Ca incrementó las vacancias de oxígeno y favoreció la estabilidad térmica durante la división termoquímica del agua.
Cai et al.	2024	Óxidos complejos	Propusieron un enfoque computacional para seleccionar materiales con comportamiento redox estable y potencial para generación de hidrógeno verde.
Kang et al.	2024	Ni/Al ₂ O ₃ + YSZ	Nanocompuesto empleado en reformado de biogás asistido por campo eléctrico, con aumento significativo de la conversión de CH ₄ y CO ₂ .
Lee et al.	2021	CeO ₂	Nanocatalizador soportado en cerámica porosa que mostró estabilidad durante múltiples ciclos termoquímicos sin reacciones secundarias indeseables.
Kostera Gonsalvi	y 2024	Biomasa derivada de glicerol y monosacáridos	La deshidrogenación aceptora-libre se identificó como una alternativa para producir H ₂ a partir de moléculas orgánicas renovables.
Li et al.	2024	Biomasa y nanomateriales	Revisión sobre el uso de nanotecnología para mejorar la producción de biohidrógeno por rutas termoquímicas, biológicas y electroquímicas.
Sorbino et al.	2024	Ni–Ru/CeO ₂	Catalizadores para reformado de metano a baja temperatura (<600 °C) con buena actividad catalítica y estabilidad operativa.
Moravvej et al.	2024	Ni–Y/SiO ₂	Catalizadores de níquel modificados con itrio que mostraron estabilidad y buen desempeño en reformado de biogás entre 500 y 700 °C.

Nota. Elaboración propia.

La información presentada en la **Tabla 3** evidenció que los estudios se concentraron principalmente en óxidos metálicos redox, perovskitas y catalizadores basados en níquel. Los óxidos y perovskitas fueron ampliamente investigados para ciclos termoquímicos de división del

agua por a su capacidad de intercambio de oxígeno y comportamiento redox y los materiales basados en níquel por su aplicación en procesos de reformado de metano y biogás.

El análisis de los estudios revisados evidenció un interés creciente por desarrollar materiales con mayor movilidad de oxígeno, mejor comportamiento redox y menor susceptibilidad a procesos de desactivación. Se identificaron tres enfoques principales: (i) el uso de óxidos metálicos y perovskitas en ciclos termoquímicos solares, (ii) el desarrollo de catalizadores metálicos para el reformado de metano y biogás, y (iii) las rutas catalíticas basadas en biomasa con apoyo de la nanotecnología. Estos enfoques reflejan el esfuerzo por mejorar la eficiencia energética de los procesos y fortalecer la viabilidad de una producción sostenible de hidrógeno.

3.1.2.1 Óxidos metálicos y perovskitas.

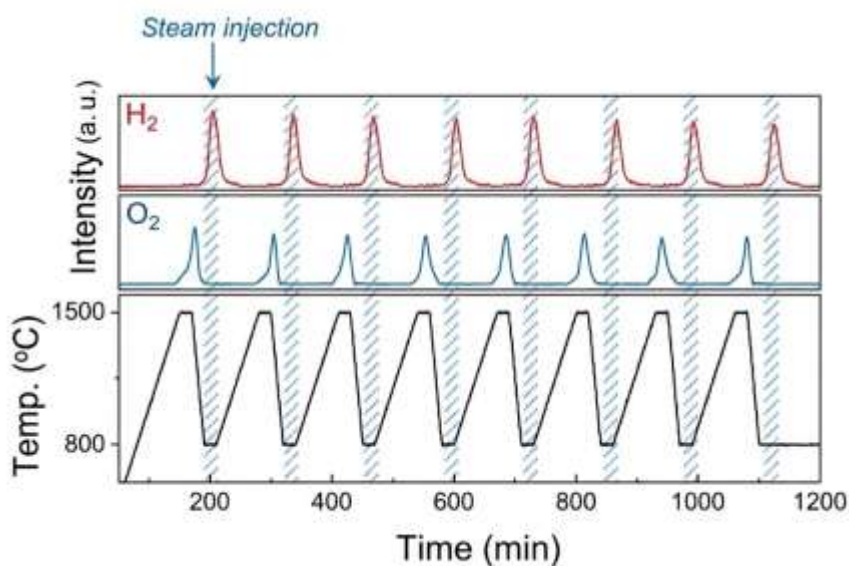
El desarrollo de los ciclos termoquímicos solares de división del agua (STWS) ha estado históricamente condicionado por la estabilidad química de sus componentes; de ahí que los óxidos metálicos y las perovskitas concentren la mayor parte de la atención científica debido a su capacidad intrínseca para mitigar la resistencia al transporte cinético mediante el intercambio reversible de oxígeno en fases redox consecutivas.

En el grupo de los óxidos puros, la ceria (CeO_2) destaca como un material de referencia debido a una combinación crítica: una elevada movilidad de oxígeno subsuperficial y una ventana de estabilidad estructural que no colapsa tras ciclos térmicos severos. Un aspecto clave en su optimización es que, al acoplar este óxido a soportes cerámicos porosos, no solo se incrementa la tolerancia macroestructural al choque térmico, sino que se reduce el camino de difusión molecular de los gases reactivos. Este enfoque garantiza que el rendimiento de

conversión de H_2 permanezca constante a lo largo del tiempo, un fenómeno cuyos perfiles dinámicos de desorción de oxígeno y evolución de hidrógeno se analizan en la **Figura 15**.

Figura 15

Liberación de O_2 y producción de H_2 durante ocho ciclos termoquímicos consecutivos empleando nanofibras de CeO_2 -mullita.



Nota. Adaptado de Lee et al. (2021).

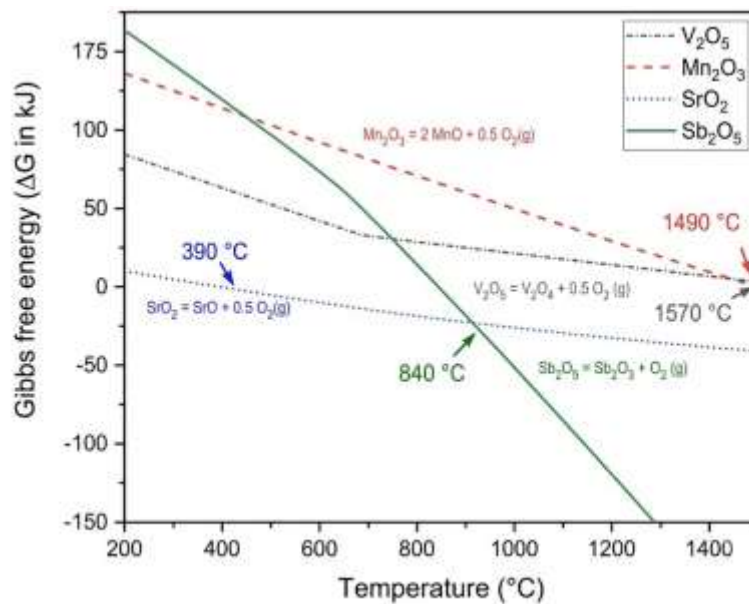
Por su parte, las perovskitas resuelven un desafío metalúrgico diferente: la formación termodinámicamente favorable de vacancias de oxígeno sin inducir transiciones de fase destructivas. Al examinar composiciones específicas, los sistemas de $La_{0.6}Sr_{0.4}MnO_3$ dopados con Ga o Al exhiben las cinéticas de producción de hidrógeno más competitivas, mientras que la sustitución parcial con Ca en matrices de $LaMnCoO_3$ funciona como un estabilizador térmico frente a las altas temperaturas de reducción. La evidencia de la literatura (McCord et al., 2024; Yiğiter y Pişkin, 2022) véase **apéndices C y D** valida que el dopaje catiónico es una herramienta

de ingeniería de materiales indispensable para modular la entalpía de reducción y suprimir los mecanismos de sinterización y degradación estructural.

A pesar de estas ventajas, mapear experimentalmente el espacio composicional de estos óxidos complejos resulta ineficiente. Es aquí donde herramientas de cribado computacional de alto rendimiento, como el marco *iSERG* (Cai et al., 2024) redefinen el flujo de trabajo metalúrgico, permitiendo predecir la idoneidad energética de una fase antes de su síntesis en el laboratorio. A partir de los criterios de selección derivados de las energías libres de reacción y los límites operativos evaluados para óxidos, espinelas y perovskitas detallados en la **Figura 16**, queda claro que el éxito de STWS depende de un compromiso de diseño: balancear la reactividad redox con la durabilidad mecánica del óxido avanzado.

Figura 16

Variación de la energía libre de Gibbs ($\Delta G_r, T$) de diferentes óxidos metálicos en función de la temperatura de reducción.



Nota. Adaptado de Nassereddine et al. (2021).

3.1.2.2 Catalizadores metálicos para reformado

A nivel industrial, los catalizadores basados en níquel representan alto desarrollo tecnológico en los procesos de reformado de metano y biogás. Esta predilección responde a un balance de diseño crítico: el metal base ofrece una actividad cinética altamente competitiva a una fracción del costo operativo de los metales nobles tradicionales. Sin embargo, la viabilidad metalúrgica a largo plazo de estos sistemas se ve severamente comprometida por fenómenos de desactivación simultáneos: la sinterización de la fase activa por coalescencia térmica y la nucleación de depósitos carbonosos (formación de coque). Ambos mecanismos bloquean los sitios activos y degradan irreversiblemente el desempeño del catalizador bajo regímenes de operación prolongados.

Dadas esas brechas, se ha impulsado el diseño de interfaces mediante la modificación estructural de soportes y el dopaje con promotores metálicos específicos. En este contexto, los sistemas Ni–Ru/CeO₂ presentaron una mayor resistencia a la formación de coque y una mejor dispersión de las partículas activas de níquel. Estas características hicieron posible operar a temperaturas inferiores a 600 °C con una menor desactivación del catalizador. La incorporación de pequeñas cantidades de Ru favoreció la estabilidad de la fase Ni y mejoró el desempeño durante el reformado de metano (Sorbino et al., 2024)

Por otra parte, Moravvej et al. (2024) encontraron que la morfología del soporte influye de manera importante en la estabilidad del proceso al evaluar catalizadores de níquel modificados con itrio y soportados sobre sílice mesoporosa. Las estructuras tipo hollow limitaron el crecimiento de las partículas de Ni y redujeron el depósito de carbono después de 50 h de operación, lo que les permitió alcanzar un desempeño superior al obtenido con las

configuraciones *bulk* y *yolk-shell* véase **Apéndice E**. De esta forma, el desempeño de los catalizadores basados en níquel depende de la fase activa como del diseño del soporte y la incorporación de promotores.

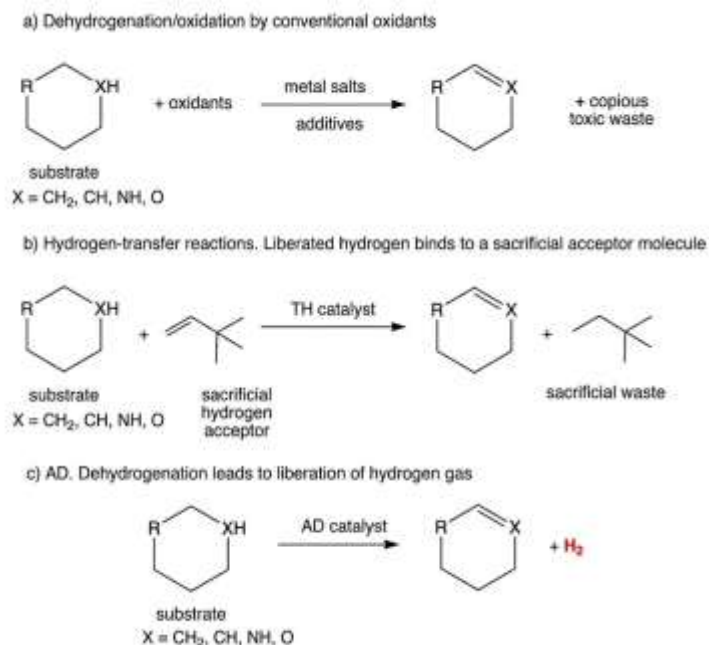
3.1.2.3 Rutas catalíticas derivadas de biomasa y estrategias emergentes

Para la obtención de hidrógeno a partir de recursos renovables y compuestos ricos en hidrógeno, como glicerol y monosacáridos, se plantean las rutas catalíticas derivadas de biomasa contribuyendo a esquemas de economía circular.

La deshidrogenación aceptora-libre (*Acceptorless Dehydrogenation*, AD), es una de esas estrategias; sobresale por la posibilidad de producir hidrógeno sin utilizar agentes oxidantes externos. Los estudios revisados coinciden en que tanto el glicerol como los azúcares simples pueden aprovecharse para generar hidrógeno y, al mismo tiempo, producir compuestos de valor agregado. El esquema general de estas reacciones se muestra en la **Figura 17**.

Figura 17

Esquema general de las reacciones de deshidrogenación aceptora-libre empleadas para la producción de hidrógeno a partir de compuestos derivados de biomasa.



Nota. Adaptado de Kostera y Gonsalvi (2024).

Por otro lado, se observó la mejora de los procesos de conversión de biomasa mediante el uso de nanopartículas, soportes porosos y materiales modificados. Estas estrategias permitieron la transferencia de masa y energía, aumentando el desempeño de las rutas termoquímicas, biológicas y fotoelectroquímicas (Li et al., 2024).

La aplicación de campos eléctricos externos también fue abordada en algunas investigaciones. Los sistemas basados en nanocompuestos Ni/Al₂O₃ + YSZ incrementaron las conversiones de CH₄ y CO₂ de valores cercanos al 60 % a más del 90 %, comportamiento asociado a la activación de vacancias de oxígeno y a una mejora en la cinética de reacción. Esto demuestra el potencial de integrar catalizadores convencionales y soportes conductores iónicos

para aumentar la eficiencia del reformado de biogás y reducir sus requerimientos energéticos (Kang et al., 2024)

3.1.3 Métodos biológicos

La producción de hidrógeno verde por rutas biológicas ha surgido como una alternativa factible a través del uso de biomasa y fuentes renovables. En los estudios predominó el uso de materias primas de origen vegetal y de nanomateriales, por su potencial para la eficiencia de los procesos biológicos y bioquímicos. Los materiales identificados y sus principales hallazgos se muestran en la **Tabla 4**.

Tabla 4
Materiales reportados en métodos biológicos para la producción de hidrógeno verde.

Autor	Año	Material de estudio	Principales hallazgos
Li et al.	2023	Materias primas derivadas de biomasa	Nanotecnología como una estrategia para la eficiencia de la producción de hidrógeno a partir de biomasa a través de rutas biológicas, termoquímicas y electroquímicas.
Goren et al.	2024	Materias primas derivadas de biomasa vegetal	Potencial de los procesos biológicos e híbridos basados en biomasa vegetal y nanoaditivos para la producción sostenible de biohidrógeno.

Nota. Elaboración propia.

Los métodos biológicos aún presentan un desarrollo más limitado a diferencia de las rutas electroquímicas y termoquímicas; sin embargo la literatura identificó a la biomasa y los residuos agroindustriales como materias primas con potencial para la producción de biohidrógeno. También los procesos híbridos y materiales nanoestructurados se incorporaron para mejorar la eficiencia de conversión y aumentar la viabilidad tecnológica de estos sistemas, contribuyendo a

reducir el impacto ambiental y ampliar las alternativas para la producción sostenible de hidrógeno.

3.1.3.1 Nanotecnología aplicada a procesos biológicos.

En los métodos biológicos, la nanotecnología se incorporó principalmente en procesos como la fermentación oscura, la fotofermentación y las celdas de electrólisis microbiana (MEC). Los estudios reportaron que nanomateriales como los óxidos de níquel (NiO) y cobalto (CoO) incrementaron la actividad microbiana y duplicaron la producción de hidrógeno en bacterias como *Clostridium beijerinckii*. Además, estos procesos operaron a temperaturas entre 30 y 60 °C y a presión atmosférica, condiciones que redujeron los requerimientos energéticos frente a las rutas termoquímicas convencionales (Li et al., 2023).

3.1.3.2 Producción de biohidrógeno a partir de biomasa vegetal.

Se identificó a la biomasa vegetal como una de las principales materias primas para la producción biológica de hidrógeno. Entre las alternativas evaluadas, los sistemas híbridos que combinaron fermentación oscura y fotofermentación alcanzaron los mayores rendimientos, con valores de hasta 680,8 mL $\text{H}_2 \cdot \text{g}^{-1}$ de biomasa. En términos de desempeño ambiental, la fotofermentación registró el menor impacto (1,88 kgCO₂eq/kgH₂) y la combinación DF-MEC alcanzó 14,8 kgCO₂eq/kgH₂ debido a sus mayores requerimientos energéticos. Entre los recursos más utilizados predominaron residuos agrícolas como la paja de arroz, el bagazo de caña y los residuos de maíz, además de cultivos energéticos utilizados como materia prima. Aun así, estos materiales requirieron tratamientos previos para facilitar la liberación de azúcares fermentables y mejorar la eficiencia del proceso (Goren et al., 2024).

3.3 Comparación global de materiales

La comparación de los materiales empleados en la producción de hidrógeno verde consideró su función principal, abundancia relativa, costo, eficiencia reportada y durabilidad. Para realizar este análisis, se integró la información obtenida en las rutas de electrólisis, los procesos termoquímicos y los métodos biológicos. Esta comparación permitió valorar el potencial de aplicación de cada grupo de materiales desde una perspectiva técnica y económica. Los resultados se muestran en la **Tabla 5**.

Tabla 5

Comparación de materiales utilizados en la producción de hidrógeno verde según función, abundancia, costo, eficiencia y durabilidad

Material	Función o característica principal	Abundancia (% masa)	Costo (USD/kg)	Eficiencia	Durabilidad
Fe	Óxidos e hidróxidos activos para OER; bajo costo.	6.30	0.115	Media–alta	Media–alta
Ti	TiO ₂ semiconductor y resistente a corrosión.	0.66	13	Media	Alta
Zr	Forma ZrO ₂ , óxido muy estable usado en soportes.	0.013	25	Media	Alta
Ni	Material clave para HER/OER; forma fosfuros y sulfuros activos.	0.0090	17	Alta	Media–alta
Co	Utilizado en OER y en fosfuros, sulfuros y espinelas.	0.0030	37.48	Media–alta	Media
Cu	Buen conductor; empleado como dopante y soporte.	0.0068	9.48	Media	Media
Zn	Forma ZnO y espinelas; estabiliza estructuras.	0.0079	2.78	Media	Media
Mo	Muy activo para HER en sulfuros, carburos y fosfuros.	0.00011	47	Media–alta	Media
W	WO ₃ semiconductor con alta estabilidad térmica.	0.00011	31.5	Media	Media

Material	Función o característica principal	Abundancia (% masa)	Costo (USD/kg)	Eficiencia	Durabilidad
Ta	Ta ₂ O ₅ altamente estable y resistente a corrosión.	0.00017	207.6	Media	Alta
Cd	Semiconductor fotocatalítico de alta actividad pero tóxico.	0.000015	4.1	Alta	Baja–media
Bi	Utilizado en oxihaluros, óxidos y sulfuros fotoactivos.	0.0000025	11.68	Media–alta	Media
Pt	Referencia para HER; muy alta actividad catalítica.	0.0000037	30.6	Muy alta	Alta
Ru	Excelente desempeño para OER.	0.0000001	14.1	Muy alta	Media
Mn	Óxidos activos para OER; abundante y económico.	0.11	0.58	Media	Media–alta
P	Componente de fosfuros que mejora conductividad y HER/OER.	0.10	0.10	Alta	Media–alta
Ce	Elevada capacidad redox y resistencia al coque.	8.23	1	Media	Alta
Al	Alta resistencia a corrosión; frecuente en soportes.	4.15	2.87	Media–baja	Alta
Ca	Óxidos e hidróxidos básicos para captura de CO ₂ .	0.0019	0.155	Media	Media–alta
La	Promotor catalítico en perovskitas.	0.0033	1	Media–baja	Media
Y	Estabilizante térmico y estructural.	0.0039	33	Media	Alta
Ga	Modificador electrónico en óxidos y perovskitas.	0.00665	450	Media	Alta
Pd	Alta afinidad por H y elevada resistencia a corrosión.	0.0000015	31500	Alta	Alta
Al ₂ O ₃	Soporte refractario de alta área superficial.	Compuesto	0.501	—	Alta
Y ₂ O ₃	Soporte y estabilizante térmico.	Compuesto	8	Media	Alta
NiO	Promotor catalítico para procesos OER.	Compuesto	17.3	Media–alta	Media
CoO	Óxido redox utilizado como promotor catalítico.	Compuesto	29.5	Media–alta	Moderada

Material	Función o característica principal	Abundancia (% masa)	Costo (USD/kg)	Eficiencia	Durabilidad
Fe ₃ O ₄	Óxido conductor empleado en soportes.	Compuesto	2	Media–baja	Media–alta
TiO ₂	Semiconductor estable utilizado en fotocatalisis.	Compuesto	3.3	Media–baja	Alta

Nota. Elaboración propia a partir de los estudios revisados. La tabla incluye elementos metálicos, elementos no metálicos y compuestos representativos reportados para la producción de hidrógeno verde.

Como se muestra en la **Tabla 5**, ningún material reúne por sí solo alta eficiencia, estabilidad y bajo costo. Es por esto que la producción de hidrógeno verde requiere combinar materiales que ofrezcan un equilibrio entre desempeño catalítico, disponibilidad y viabilidad económica.

El Pt, Ru y Pd, alcanzaron los mejores desempeños en términos de actividad catalítica y estabilidad, por lo que continúan siendo materiales de referencia para las reacciones HER y OER. Sin embargo, su escasez y alto costo limitan su aplicación a gran escala. Esto ha impulsado el desarrollo de estrategias basadas en bajas cargas metálicas, aleaciones y sistemas híbridos.

En contraste, Fe, Ni, Co y Mn, ofrecieron una relación más favorable entre desempeño y costo. Mientras Ni y Co sobresalieron por su elevada actividad catalítica, Fe y Mn destacaron por su abundancia y menor costo. Estas características han favorecido el desarrollo de fosfuros, sulfuros, carburos y nanoestructuras basadas en estos elementos como alternativas a los metales nobles.

Además, elementos como P y Mo cumplieron un papel importante como modificadores catalíticos. Los fosfuros metálicos mejoraron la conductividad y facilitaron la adsorción de

especies intermedias durante las reacciones HER y OER. A su vez, el Mo incrementó la actividad catalítica al incorporarse en sulfuros, carburos o materiales dopados, lo que permitió aumentar el rendimiento sin depender de elementos críticos.

Los óxidos estables y los materiales de soporte, entre ellos TiO_2 , ZrO_2 , Al_2O_3 , Y_2O_3 y Ta_2O_5 , aportaron principalmente estabilidad estructural. Además, favorecieron la dispersión de las fases activas y redujeron los procesos de degradación del sistema.

3.4 Desafíos tecnológicos asociados a los materiales para la producción de hidrógeno verde.

En este apartado se analizan los principales desafíos tecnológicos asociados a los materiales utilizados en la producción de hidrógeno verde. Se examinan aspectos como la dependencia de materiales críticos, la degradación y corrosión de los componentes, las exigencias relacionadas con la calidad del agua, las limitaciones en la eficiencia catalítica y las dificultades para escalar estas tecnologías a nivel industrial.

3.4.1 Dependencia de materiales críticos y costos de producción.

Los electrolizadores de membrana de intercambio protónico (PEM) ocupan un lugar central en la producción de hidrógeno verde debido a su capacidad para operar con elevadas densidades de corriente y generar hidrógeno de alta pureza. Estas ventajas, sin embargo, dependen del uso de materiales críticos cuya disponibilidad es limitada y cuyo costo sigue siendo elevado. Entre ellos destacan el platino (Pt), el iridio (Ir), el rutenio (Ru) y el rodio (Rh), empleados como catalizadores en las reacciones HER y OER. Además, la membrana polimérica

Nafion cumple una función esencial al transportar protones y separar los gases generados durante el proceso (Iberdrola, 2024).

La elevada actividad catalítica y la resistencia a la corrosión mantienen a Pt, Ir, Ru y Rh como materiales de referencia en los electrolizadores PEM. Sin embargo, su escasa disponibilidad y el costo asociado a su obtención continúan siendo uno de los principales obstáculos para ampliar esta tecnología (Buttler y Spliethoff, 2018).

Para reducir esta dependencia, diferentes investigaciones evaluaron estrategias orientadas a disminuir la cantidad de metales nobles o sustituirlos parcialmente por elementos más abundantes, como Fe, Ni y Co. Los sistemas Pt–TiO₂–Mo y RuO₂/(Co,Mn)₃O₄, mostraron que el uso de soportes avanzados y óxidos mixtos permitió mantener un alto desempeño con menores cantidades de Pt y Ru (Chen et al., 2020; Niu et al., 2021). Los materiales basados en Fe, Ni y Co también alcanzaron resultados competitivos en las reacciones HER y OER, lo que apoya su potencial para reducir costos sin comprometer de forma significativa la eficiencia electroquímica.

Conforme a lo anterior, la disponibilidad de materiales críticos continúa limitando la expansión de los electrolizadores PEM, por lo que gran parte de las investigaciones actuales se orienta al desarrollo de catalizadores basados en metales abundantes, soportes avanzados y sistemas híbridos que mejoren su viabilidad económica.

3.4.2 Degradación de materiales y control de la corrosión.

La degradación de los materiales sigue siendo uno de los principales desafíos para la producción de hidrógeno verde. Los sistemas de electrólisis y conversión termoquímica operan bajo condiciones químicas, térmicas y electroquímicas exigentes que aceleran el deterioro de

membranas, componentes estructurales y catalizadores, lo que reduce su estabilidad y afecta la confiabilidad durante la operación.

En los electrolizadores de membrana de intercambio protónico (PEM), el deterioro se presenta principalmente en las membranas de intercambio protónico. Los esfuerzos mecánicos y los ambientes altamente oxidantes favorecen la aparición de grietas, perforaciones y microagujeros. Como resultado, aumenta la mezcla de H_2 y O_2 , disminuye la eficiencia en la separación de gases y se incrementan los riesgos operativos. Arun M. (2025) también reportó que las membranas de Nafion experimentaron un adelgazamiento progresivo después de largos periodos de operación, situación que limitó su desempeño a largo plazo.

El deterioro no se limita a las membranas; las placas bipolares (BPP), los colectores de corriente y las capas de transporte poroso también están expuestos a procesos de corrosión. Cuando materiales como el acero y el cobre operan en el ambiente oxidante del ánodo sin una protección adecuada, liberan especies metálicas que contaminan la membrana y alteran el transporte de protones.

Para enfrentar estos problemas, diferentes investigaciones evaluaron materiales con mayor resistencia química y estructural. Los sistemas $Pt-TiO_2-Mo$ y $RuO_2/(Co,Mn)_3O_4$ mantuvieron la estabilidad química y la actividad catalítica bajo condiciones exigentes (Chen et al., 2020; Niu et al., 2021). De manera similar, materiales termoquímicos basados en CeO_2 y perovskitas dopadas con Ga, Al o Ca soportaron múltiples ciclos redox con una menor degradación estructural (Lee et al., 2021; McCord et al., 2024; Yiğiter y Pişkin, 2022). En los procesos de reformado, la optimización de los soportes y el empleo de promotores redujeron la sinterización, el depósito de carbono y la pérdida de actividad catalítica durante operaciones prolongadas (Moravvej et al., 2024; Sorbino et al., 2024).

3.4.3 Calidad del agua y condiciones de operación.

Los electrolizadores de membrana de intercambio protónico (PEM) requieren agua altamente desionizada para mantener un funcionamiento estable. La presencia de impurezas contamina la membrana y el ionómero, reduce la conductividad protónica, acelera el deterioro de los componentes y disminuye el rendimiento del sistema (Iberdrola, 2024).

Este requisito obliga a incorporar etapas de purificación y monitoreo del agua, lo que incrementa los costos de operación. Al mismo tiempo, ha impulsado el desarrollo de configuraciones capaces de mantener un funcionamiento estable aun cuando el agua presente mayores niveles de contaminación.

El agua de mar también se ha considerado una alternativa para disminuir la demanda de agua dulce. Sin embargo, su elevada concentración de iones cloruro (Cl^-) favorece la reacción de evolución de cloro (CIER), genera especies corrosivas que compiten con la reacción de evolución de oxígeno (OER) y reduce la eficiencia del proceso (Fayemi et al., 2025).

Además, la composición iónica del agua de mar favorece la formación de incrustaciones y la acumulación de residuos, lo que acelera el deterioro de electrodos y membranas. Estas limitaciones han orientado el desarrollo de materiales y sistemas capaces de operar con fuentes hídricas de menor pureza sin comprometer su desempeño.

3.4.4 Limitaciones de eficiencia y desempeño catalítico

Los materiales empleados en las reacciones de evolución de hidrógeno (HER) y evolución de oxígeno (OER) determinan el desempeño de los sistemas de producción de hidrógeno verde. Los catalizadores basados en Fe, Ni, Co, Mo y P han despertado interés por su

potencial para sustituir materiales críticos; sin embargo, presentan limitaciones en actividad catalítica, conductividad eléctrica y estabilidad durante la operación, lo que reduce su eficiencia.

Entre ellos, el MoS_2 destaca por la elevada actividad catalítica de los sitios activos ubicados en sus bordes. A pesar de ello, su baja conductividad intrínseca dificulta la transferencia de electrones cuando se emplea de forma aislada. Para mejorar este comportamiento, varias investigaciones desarrollaron heteroestructuras y materiales compuestos que facilitaron el transporte de carga y aumentaron el número de sitios catalíticos disponibles (Liu et al., 2021; Zhuge et al., 2021).

Fosfuros metálicos como $\text{Ni}_2\text{P-CuP}_2$ y CoP@FeCoP alcanzaron bajos sobrepotenciales y mantuvieron una buena estabilidad operativa. Aun así, su desempeño continuó dependiendo del dopaje, la nanoestructuración y el empleo de soportes conductores para acelerar la cinética de reacción (Riyajuddin et al., 2021; Shi et al., 2021). De forma similar, materiales basados en Fe, Ni y Co, como $\text{Co-Fe}_2\text{O}_3$, lograron un desempeño competitivo frente a catalizadores convencionales y demostraron el potencial de los metales abundantes para aplicaciones de electrólisis (Ahmad et al., 2024).

Dentro de la electrólisis, la reacción de evolución de oxígeno (OER) continúa siendo la etapa más exigente de la electrólisis. Requiere mayores sobrepotenciales y su mecanismo de reacción involucra un mayor número de etapas, lo que incrementa las pérdidas energéticas del proceso (Buttler y Spliethoff, 2018; Dawood et al., 2020).

3.4.5 Escalabilidad industrial y sostenibilidad.

La escalabilidad es una de las principales limitaciones para incorporar nuevos materiales en la producción de hidrógeno verde. Aunque investigaciones han reportado resultados favorables en laboratorio, reproducir ese desempeño a escala industrial continúa siendo complejo. Esto ocurre con materiales como las estructuras metal-orgánicas (MOFs), las heteroestructuras y las nanoarquitecturas híbridas, cuya síntesis requiere condiciones difíciles de mantener en procesos de fabricación a gran escala, lo que restringe su adopción comercial (Kampouri et al., 2021; Xie et al., 2021).

La disponibilidad de las materias primas añade otra dificultad; mientras Pt, Ru e Ir dependen de elementos escasos y de cadenas de suministro especializadas, Fe, Ni y Mn ofrecen una alternativa más accesible por su mayor disponibilidad y menor costo. Esta diferencia explica por qué buena parte de las investigaciones recientes se ha centrado en desarrollar catalizadores a partir de estos elementos (Buttler y Spliethoff, 2018).

En cuanto a la sostenibilidad, se ha priorizado el desarrollo de materiales que disminuyan la dependencia de elementos críticos para fabricar a gran escala; de esta forma el desafío consiste en desarrollar sistemas que combinen tanto alto desempeño catalítico, estabilidad operativa y materias primas abundantes para facilitar su aplicación y ampliar la producción de hidrógeno verde.

4. Conclusiones

La presente revisión bibliográfica, enfocada en los materiales para la producción de hidrógeno verde, evidencia el requerimiento de una cuidadosa selección de materiales que equilibren eficiencia, estabilidad y costo. Los metales nobles como Platino, Iridio y Rutenio continúan ofreciendo el mejor desempeño catalítico para las reacciones de HER y OER; sin embargo, la investigación reciente muestra una transición hacia el uso de otros metales como Hierro, Níquel, Cobalto y Manganese. Estos elementos integrados en nanoestructuras, sulfuros, fosfuros y sistemas híbridos constituyen alternativas debido a su abundancia y menor costo.

Las condiciones operativas severas representan barreras para que cada una de las tecnologías de producción de hidrógeno se implemente a gran escala, entre las barreras se destacan la degradación de componentes, las limitaciones de la eficiencia catalítica y las exigencias asociadas a la calidad del agua que reducen de forma considerable la vida útil de los equipos. La brecha es evidente en las nanoestructuras y sistemas híbridos que, aunque muestran un desempeño sobresaliente a nivel laboratorio, a nivel industrial su síntesis es compleja y poco viable comercialmente, es por ello que resulta importante la evaluación de cada uno de los materiales empleados a condiciones reales de operación.

En general, la consolidación del hidrógeno verde como alternativa energética sostenible dependerá del desarrollo de materiales que integren eficiencia, durabilidad, disponibilidad y viabilidad económica.

5. Recomendaciones

En futuras investigaciones sobre hidrógeno verde, en primer lugar dar continuidad a la sustitución de metales nobles; seguir evaluando catalizadores basados en elementos abundantes, como Fe, Ni, Co y Mn para reducir la dependencia a dichos metales sin afectar el desempeño de los sistemas, también explorar electrodos que puedan operar con agua de mar y otras fuentes hídricas de menor pureza, de manera que sea posible disminuir la demanda de agua desionizada sin comprometer la estabilidad del proceso.

En segundo lugar, Profundizar en el estudio de membranas, electrodos y materiales estructurales que resistan mejor las condiciones químicas, térmicas y mecánicas presentes durante la producción de hidrógeno verde.

En tercer lugar, las investigaciones deben incluir de manera sistemática la ejecución de pruebas piloto e industriales para los materiales emergentes, incorporando no solo indicadores de desempeño técnico, sino también aspectos relacionados con el costo, la disponibilidad de materias primas, la vida útil y la posibilidad de fabricar estos materiales a escala industrial.

Referencias bibliográficas

- Abe, J. O., Popoola, A. P. I., Ajenifuja, E., & Popoola, O. M. (2019). Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(29), 15072–15086. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.068>
- ACCIONA. (2020). *El hidrógeno verde: la energía del futuro clave en la descarbonización*. <https://www.acciona.com/es/hidrogeno-verde>
- Adak, M. K., Mondal, D., Mahato, U., Basak, H. K., Mandal, S., Das, A., ... & Dhak, D. (2023). Nanoarchitectonics of zirconium modified ZnTiO₃ for photo and electro-catalysts in dye degradation and water splitting applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(100), 39910-39929. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.211>
- Alzahrani A. (2023) Portable prototype of hydrogen fuel cells for educational training. *Applied Sciences*; 13(1):608. <https://doi.org/10.3390/app13010608>
- Ahmad, S., Khan, M., Khan, S. B., & Asiri, A. M. (2024). Effect of cobalt-doped iron oxide as an electrocatalyst for water splitting and photocatalytic hydrogen evolution. *Inorganic Chemistry Communications*, 170, 113421. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113421>
- Anand, C., Chandrara, B., Nithiya, P., Akshaya, M., Tamizhduraia, P., Shoba, G., Subramani, A., Kumaran, R., Yadav, K. K., Gacem, A., Bhutto, J. K., Alreshidi, M. A., & Alam, M. W. (2025). Green hydrogen for a sustainable future: A review of production methods, innovations, and applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 145, 321–335. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.02.257>

- Arun, M., Babu, A. S., Hariram, N., Kumar, N. M., Kumar, R., & Sharma, P. (2025). Challenges and mitigation strategies for general failure and degradation in electrolyzers for hydrogen production. *Journal of Materials Chemistry A*, 13(16), 11236-11263. Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/D4TA08823A>
- Baby, A., Trovato, L., & Di Valentin, C. (2021). Single atom catalysts (SAC) trapped in defective and nitrogen-doped graphene supported on metal substrates. *Carbon*, 174, 772-788. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.12.045>
- Buttler, A., & Spliethoff, H. (2018). Current status of water electrolysis for green hydrogen production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2440–2454. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.003>
- Cai, R., Yang, K., Wang, X., Rukh, M., Bosari, A. S., Giavedoni, E., ... & Li, F. (2024). High-throughput design of complex oxides as isothermal, redox-activated CO₂ sorbents for green hydrogen generation. *Energy & Environmental Science*, 17(17), 6279-6290. <https://doi.org/10.1039/D4EE02119C>
- Chen, K., Deng, S., Lu, Y., Gong, M., Hu, Y., Zhao, T., ... & Wang, D. (2020). Molybdenum-doped titanium dioxide supported low-Pt electrocatalyst for highly efficient and stable hydrogen evolution reaction. *Chinese Chemical Letters*, 32(2), 765-769. <https://doi.org/10.1016/j.cclet.2020.05.030>
- Dai, K., Zhang, N., Zhang, L., Yin, L., Zhao, Y., & Zhang, B. (2021). Self-supported Co/CoO anchored on N-doped carbon composite as bifunctional electrocatalyst for efficient overall water splitting. *Chemical Engineering Journal*, 414, 128804. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128804>

Dawood, F., Anda, M., & Shafiullah, G. M. (2020). Hydrogen production for energy: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(7), 3847–3869.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059>

El-Bery, H. M., Salah, M. R., Ahmed, S. M., & Soliman, S. A. (2021). Efficient non-metal based conducting polymers for photocatalytic hydrogen production: comparative study between polyaniline, polypyrrole and PEDOT. *RSC advances*, 11(22), 13229-13244.

<https://doi.org/10.1039/D1RA01218E>

Fayemi, O. E., Chikuruwo, C., Daramola, M. O., Mhlango, G. H., & Fayemi, O. E. (2025). Seawater electrolysis for hydrogen production: Challenges, innovations and future pathways. *International Journal of Green Energy*.

<https://doi.org/10.1080/15435075.2025.2572703>

Ge, Y., Qin, X., Li, A., Deng, Y., Lin, L., Zhang, M., Yu, Q., Li, S., Peng, M., Xu, Y., Zhao, X., Xu, M., Zhou, W., Yao, S., & Ma, D. (2021). Maximizing the Synergistic Effect of CoNi Catalyst on α -MoC for Robust Hydrogen Production. *Journal of the American Chemical Society*, 143(2), 628–633. <https://doi.org/10.1021/jacs.0c11285>

Goren, A. Y., Dincer, I., & Khalvati, A. (2024). Green biohydrogen production from renewable plant-based resources: a comparative evaluation. *Process Safety and Environmental Protection*, 185, 947-977. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.03.056>

Gu, X., Chen, Z., Li, Y., Wu, J., Wang, X., Huang, H., ... & Kang, Z. (2021). Polyaniline/carbon dots composite as a highly efficient metal-free dual-functional photoassisted electrocatalyst for overall water splitting. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(21), 24814-24823. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c04386>

- Hao, W., Yao, D., Xu, Q., Wang, R., Zhang, C., Guo, Y., ... & Chen, Z. (2021). Highly efficient overall-water splitting enabled via grafting boron-inserted Fe-Ni solid solution nanosheets onto unconventional skeleton. *Applied Catalysis B: Environmental*, 292, 120188. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2021.120188>
- Hatami, E., Toghræi, A., & Darband, G. B. (2021). Electrodeposition of Ni-Fe micro/nano urchin-like structure as an efficient electrocatalyst for overall water splitting. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(14), 9394-9405. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.110>
- Hota, P., Das, A., & Maiti, D. K. (2023). A short review on generation of green fuel hydrogen through water splitting. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(2), 523-541. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.09.264>
- Iberdrola. (2024) ¿Qué es un electrolizador y por qué es clave para el suministro de hidrógeno verde? Iberdrola.com <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/electrolizador>.
- IEA. (2021). *Global Hydrogen Review 2021*. IEA. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>
- Jia, Y., Liu, P., Wang, Q., Wu, Y., Cao, D., & Qiao, Q. A. (2021). Construction of Bi₂S₃-BiOBr nanosheets on TiO₂ NTA as the effective photocatalysts: Pollutant removal, photoelectric conversion and hydrogen generation. *Journal of colloid and interface science*, 585, 459–469. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.10.027>
- Kampouri, S., Ebrahim, F. M., Fumanal, M., Nord, M., Schouwink, P. A., Elzein, R., ... & Stylianou, K. C. (2021). Enhanced visible-light-driven hydrogen production through

- MOF/MOF heterojunctions. *ACS applied materials & interfaces*, 13(12), 14239-14247.
<https://doi.org/10.1021/acsami.0c23163>
- Kang, S. W., Lee, H. K., Park, J. M., Kang, J., Oh, K. H., Park, J. C., ... & Marin-Flores, O. (2025). Synergistic Effect of a Ni/Al₂O₃+ YSZ Nanocomposite for the Steam Reforming of Biogas in the Presence of Electric Fields. *Energy Technology*, 13(4), 2401074.
<https://doi.org/10.1002/ente.202401074>
- Kim, B., Jung, Y., Park, B. J., Das, G., Yoon, H. H., & Yoon, Y. S. (2022). Photo-assisted electrolysis of urea using Ni-modified WO₃/g-C₃N₄ as a bifunctional catalyst. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(9), 5797-5806.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.237>
- Kazemi, A., Manteghi, F., & Tehrani, Z. (2024). Metal electrocatalysts for hydrogen production in water splitting. *ACS omega*, 9(7), 7310-7335.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.3c07911>
- Kostera, S., & Gonsalvi, L. (2025). Sustainable Hydrogen Production by Glycerol and Monosaccharides Catalytic Acceptorless Dehydrogenation (AD) in Homogeneous Phase. *ChemSusChem*, 18(6), e202400639. <https://doi.org/10.1002/cssc.202400639>
- Kumar, N., Aepuru, R., Lee, S. Y., & Park, S. J. (2025). Advances in catalysts for hydrogen production: A comprehensive review of materials and mechanisms. *Nanomaterials*, 15(4), 256. <https://doi.org/10.3390/nano15040256>
- Lackner M, Sajjadi B & Chen W-Y (2022) *Handbook of climate change mitigation and adaptation*. 3rd ed. Cham: Springer International Publishing <https://doi.org/10.1007/978-3-030-72579-2>

- Lee, J., Lim, M., Kim, T. S., Park, K. R., Lee, J. S., Cho, H. B., ... & Choa, Y. H. (2021). Design, synthesis, and characterization of a porous ceramic-supported CeO₂ nanocatalyst for CO_x-free H₂ evolution. *Applied Surface Science*, 548, 149198.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.149198>
- Li, G., Yang, Y., Yu, Q. et al. Application of nanotechnology in hydrogen production from biomass: A critical review. *Adv Compos Hybrid Mater* 7, 17 (2024).
<https://doi.org/10.1007/s42114-023-00815-0>
- Liu, X., Wang, B., Liu, M., Liu, S., Chen, W., Gao, L., & Li, X. (2021). In situ growth of vertically aligned ultrathin MoS₂ on porous g-C₃N₄ for efficient photocatalytic hydrogen production. *Applied Surface Science*, 554, 149617.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.149617>
- McCord, D. C., Gager, E. J., Wang, X., Johnson, T. L., Beachy, J. S., King, K. A., ... & Scheffe, J. R. (2024). Solar thermochemical redox cycling using Ga- and Al-doped LSM perovskites for renewable hydrogen production. *The Journal of Physical Chemistry C*, 128(38), 15796-15806. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.4c02797>
- Moravvej, Z., Rahimpour, M. R., & Koohi-Saadi, M. (2025). Synthesis of yttrium-modified nickel catalysts on morphology-controlled mesoporous silica for green hydrogen production through biogas reforming. *International Journal of Hydrogen Energy*, 140, 988-1003. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.381>
- Nassereddine, Y., Elharraq, A., Ait Ousaleh, H., Rachidi, S., Baba, Y. F., & Faik, A. (2021, November). Screening of The Most Favorable Metal Oxides Systems for H₂ Production via Solar Thermochemical Water Splitting. In 2021 9th *International Renewable and*

Sustainable Energy Conference (IRSEC) (pp. 1-6). IEEE.

<https://doi.org/10.1109/IRSEC53969.2021.9741151>

Nayana, K., & Sunitha, A. P. (2021). Probing nanostructure MoS₂ as catalyst in light activated and electro activated hydrogen evolution reaction. *Materials Today: Proceedings*, 45, 4671-4676. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.115>

Nawaz, A., Ul Haq, I., Qaisar, K., Gunes, B., Raja, S. I., Mohyuddin, K., & Amin, H. (2022). Microbial fuel cells: Insight into simultaneous wastewater treatment and bioelectricity generation. *Process Safety and Environmental Protection*, 161, 357–373. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.03.039>

Niu, S., Kong, X. P., Li, S., Zhang, Y., Wu, J., Zhao, W., & Xu, P. (2021). Low Ru loading RuO₂/(Co, Mn) 3O₄ nanocomposite with modulated electronic structure for efficient oxygen evolution reaction in acid. *Applied Catalysis B: Environmental*, 297, 120442. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2021AppCB.29720442N/doi:10.1016/j.apcatb.2021.120442

Rasouli, H., Hosseini, M. G., & Hosseini, M. M. (2021). Ta₂O₅-incorporated in photoinduced electrocatalyst of TiO₂-RuO₂ decorated by PPy-NrGO nanocomposite for boosting overall water splitting. *Journal of colloid and interface science*, 582(Pt A), 254–269. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.08.028>

Rekha, P., Yadav, S., & Singh, L. (2021). A review on cobalt phosphate-based materials as emerging catalysts for water splitting. *Ceramics International*, 47(12), 16385-16401. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.02.215>

Riyajuddin, S., Azmi, K., Pahuja, M., Kumar, S., Maruyama, T., Bera, C., & Ghosh, K. (2021).

Super-Hydrophilic Hierarchical Ni-Foam-Graphene-Carbon Nanotubes-Ni₂P-Cu₂P

Nano-Architecture as Efficient Electrocatalyst for Overall Water Splitting. *ACS nano*,

15(3), 5586–5599. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c00647>

Samaniego-Benitez, J. E., Lartundo-Rojas, L., García-García, A., Calderón, H. A., & Mantilla, A.

(2021). One-step synthesis and photocatalytic behavior for H₂ production from water of

ZnS/MoS₂ composite material. *Catalysis Today*, 360, 99-105.

<https://doi.org/10.1016/j.cattod.2019.08.011>

Sankar, S. S., Keerthana, G., Manjula, K., Sharad, J. H., & Kundu, S. (2021). Electrospun Fe-

Incorporated ZIF-67 Nanofibers for Effective Electrocatalytic Water Splitting. *Inorganic*

chemistry, 60(6), 4034–4046. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.1c00097>

Sharma, S., Kumar, D., & Khare, N. (2021). Three-dimensional hierarchical PANI/Bi₂S₃

nanoflowers heterojunction for enhanced photoelectrochemical water splitting. *Journal of*

Alloys and Compounds, 865, 158779. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.158779>

Shen, R., He, K., Zhang, A., Li, N., Ng, Y. H., Zhang, P., ... & Li, X. (2021). In-situ construction

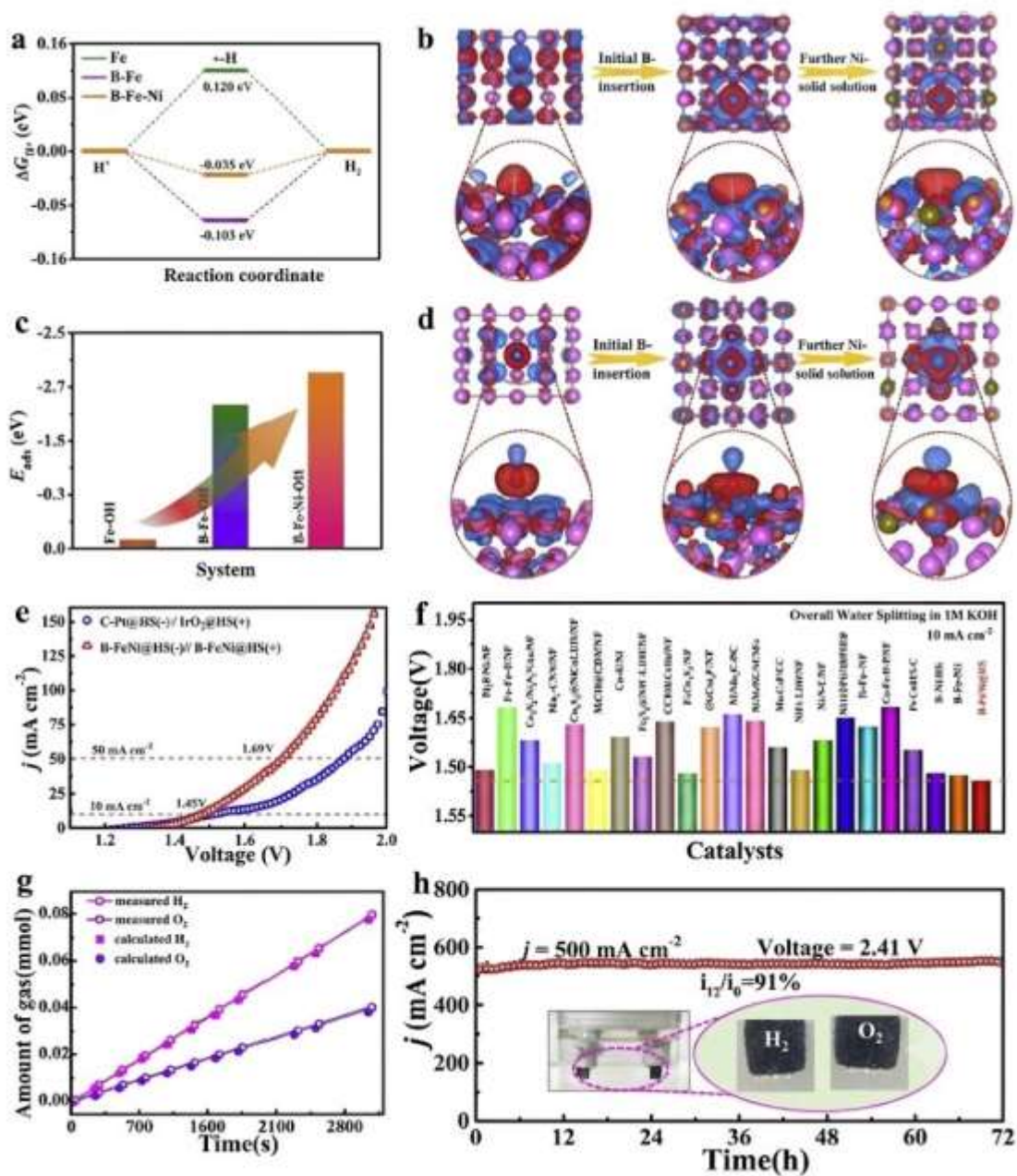
of metallic Ni₃C@ Ni core-shell cocatalysts over g-C₃N₄ nanosheets for shell-thickness-

dependent photocatalytic H₂ production. *Applied Catalysis B: Environmental*, 291,

120104. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2021.120104>

- Shen, X. Q., Xiang, K., Fu, X. Z., & Luo, J. L. (2020). High active and ultra-stable bifunctional FeNi/CNT electrocatalyst for overall water splitting. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(7), 5398-5402. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.098>
- Shi, J., Qiu, F., Yuan, W., Guo, M., & Lu, Z. H. (2021). Nitrogen-doped carbon-decorated yolk-shell CoP@ FeCoP micro-polyhedra derived from MOF for efficient overall water splitting. *Chemical Engineering Journal*, 403, 126312. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126312>
- Sorbino, G., Di Benedetto, A., Italiano, C., Thomas, M., Vita, A., Ruoppolo, G., & Landi, G. (2025). Novel Ni–Ru/CeO₂ catalysts for low-temperature steam reforming of methane. *International Journal of Hydrogen Energy*, 137, 961-975. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.385>
- Tuluhong, A., Chang, Q., Xie, L., Xu, Z., & Song, T. (2024). Current Status of Green Hydrogen Production Technology: A Review. *Sustainability*, 16(20), 9070. <https://doi.org/10.3390/su16209070>
- Vijayakumar, P., Natesan, K., Athikesavan, V., Kumaravel, S., Raja, A., Kang, M., ... & Yusuf, K. (2024). Synthesis of Ni-zeolitic imidazolate framework embedded with graphitic carbon as multifunctional composite catalyst for electrochemical water splitting and photocatalytic clofibric acid degradation performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 95, 497-509. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.11.223>

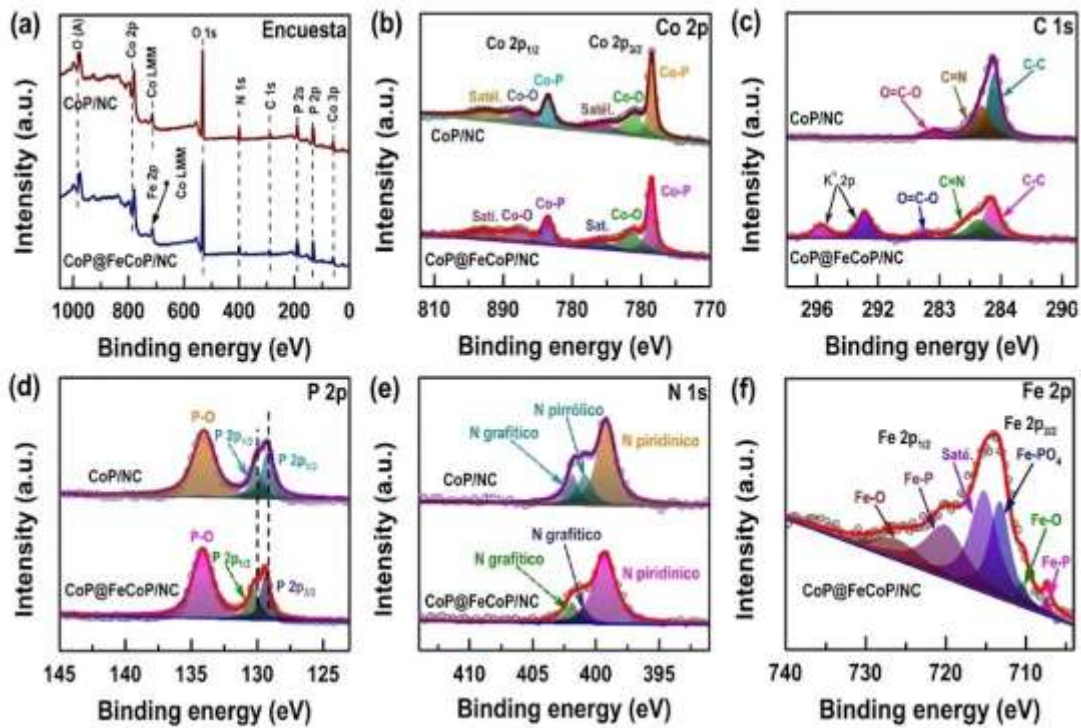
- Vinodh, R., Palanivel, T., Kalanur, S. S., & Pollet, B. G. (2024). Recent advancements in catalyst coated membranes for water electrolysis: a critical review. *Energy Advances*, 3(6), 1144-1166. <https://doi.org/10.1039/D4YA00143E>
- Wang, M., Cheng, J., Wang, X., Hong, X., Fan, J., & Yu, H. (2021). Sulfur-mediated photodeposition synthesis of NiS cocatalyst for boosting H₂-evolution performance of g-C₃N₄ photocatalyst. *Chinese Journal of Catalysis*, 42(1), 37-45. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(20\)63633-6](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(20)63633-6)
- Xie, Y., Feng, C., Guo, Y., Li, S., Guo, C., Zhang, Y., & Wang, J. (2021). MOFs derived carbon nanotubes coated CoNi alloy nanocomposites with N-doped rich-defect and abundant cavity structure as efficient trifunctional electrocatalyst. *Applied Surface Science*, 536, 147786. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147786>
- Yiğiter, İ.E., Pişkin, B. Investigation into Ca-Doped LaMnCoO₃ Perovskite Oxides for Thermochemical Water Splitting. *JOM* 74, 4682–4694 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11837-022-05493-9>
- Zhao, D., Dai, M., Liu, H., Zhu, X., & Wu, X. (2021). PPy film anchored on ZnCo₂O₄ nanowires facilitating efficient bifunctional electrocatalysis. *Materials Today Energy*, 20, 100637. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2021.100637>
- Zhuge, K., Chen, Z., Yang, Y., Wang, J., Shi, Y., & Li, Z. (2021). In-suit photodeposition of MoS₂ onto CdS quantum dots for efficient photocatalytic H₂ evolution. *Applied Surface Science*, 539, 148234. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148234>



Nota. (a–d) Diagramas de energía libre, energías de adsorción y redistribuciones de carga para las reacciones HER y OER en sistemas Fe, B-Fe y B-FeNi. (e–h) Desempeño electroquímico, comparación con electrocatalizadores bifuncionales reportados, producción de gases y ensayo de estabilidad del sistema B-FeNi@HS en medio alcalino. Tomado de Hao et al. (2021).

Apéndice B

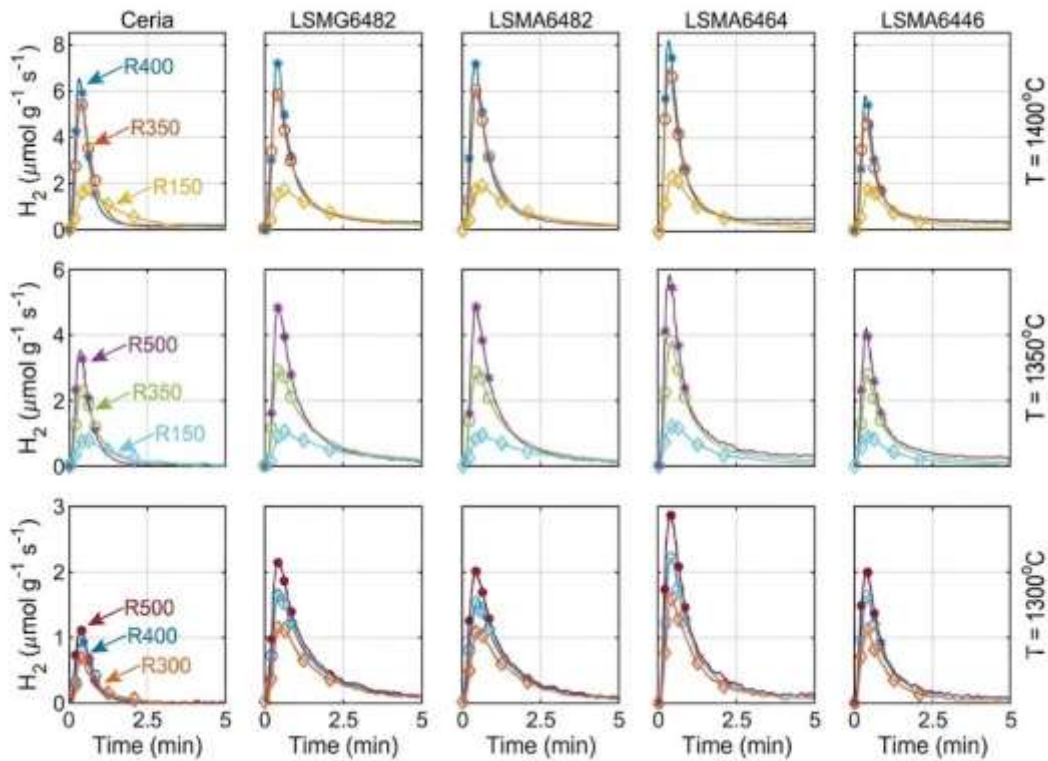
Caracterización química superficial del sistema CoP@FeCoP/NC



Nota. Espectros XPS de estudio general y de alta resolución empleados para identificar la composición química y los estados electrónicos de Co, Fe, P, N y C en los materiales CoP/NC y CoP@FeCoP/NC. Tomado de Shi et al. (2021).

Apéndice C

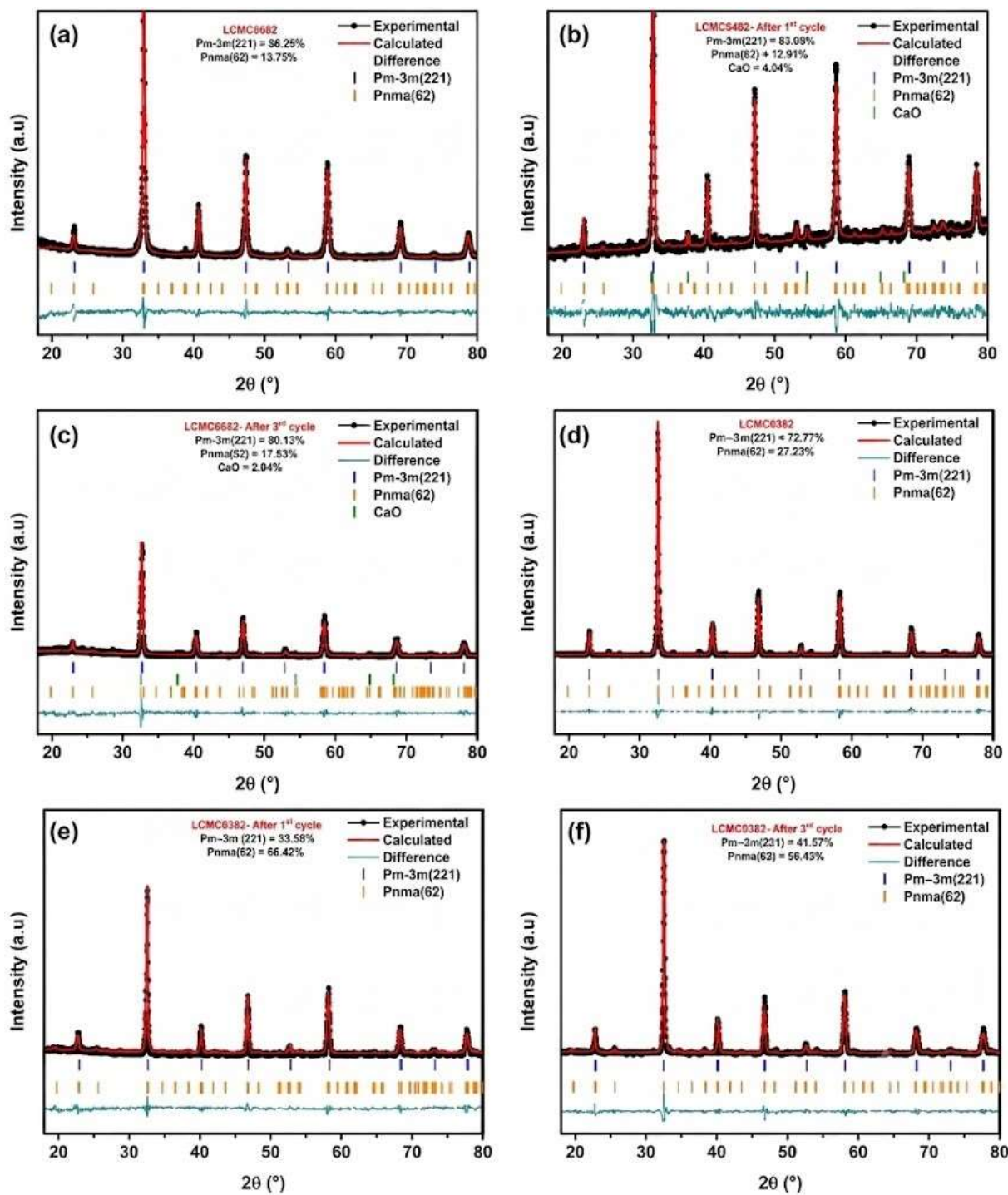
Desempeño redox de perovskitas dopadas para división termoquímica del agua



Nota. Tasas de oxidación registradas durante experimentos de división termoquímica del agua para diferentes materiales evaluados a tres temperaturas de operación, utilizadas para comparar su capacidad redox y producción de hidrógeno. Tomado de McCord et al. (2024).

Apéndice D

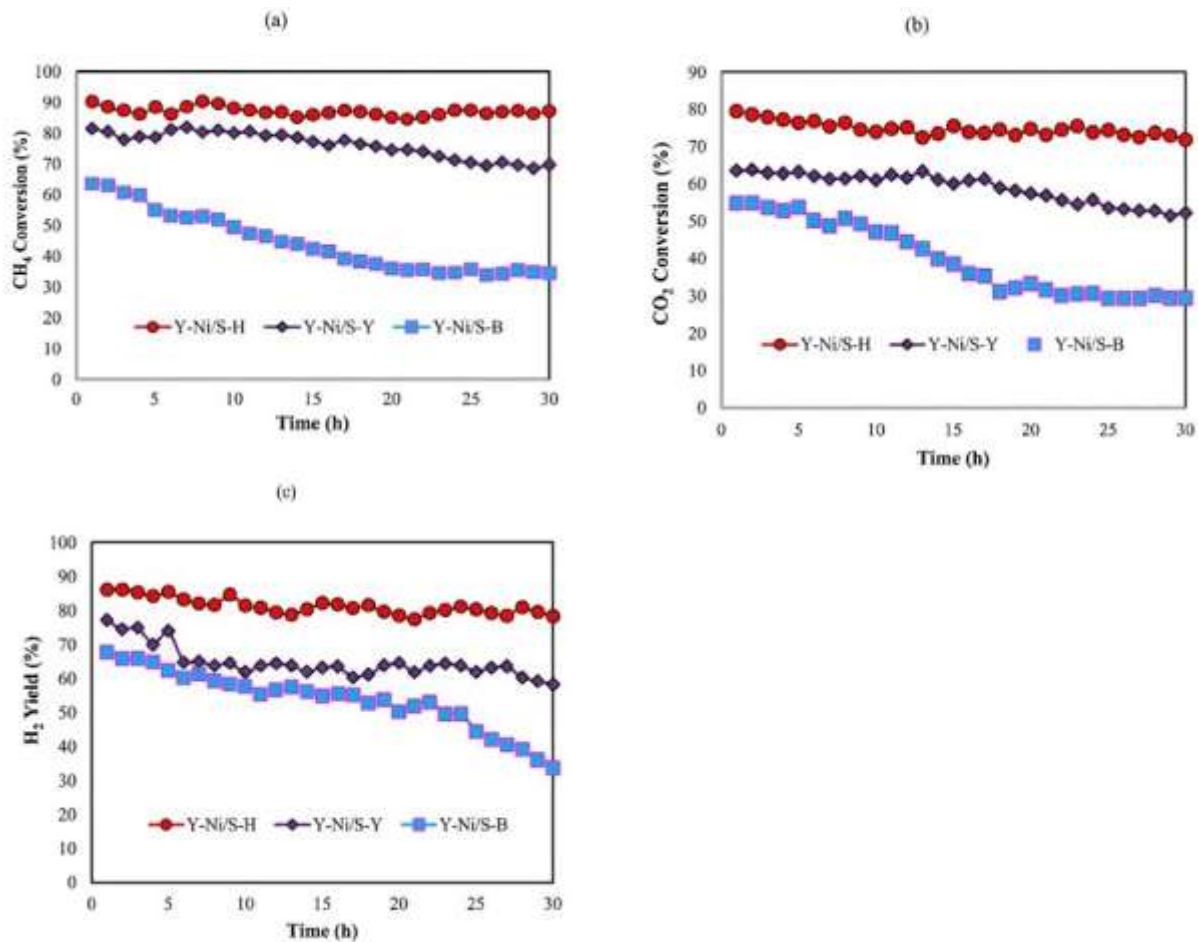
Estabilidad estructural de perovskitas durante ciclos termoquímicos



Nota. Patrones de difracción de rayos X (XRD) de las perovskitas LCMC6482 y LCMC8282 antes del proceso termoquímico, después del primer ciclo y tras tres ciclos de operación, empleados para evaluar los cambios estructurales y la estabilidad del material. Tomado de Yiğiter y Pişkin (2022).

Apéndice E

Estabilidad catalítica de sistemas Ni–Y/SiO₂ durante reformado de biogás



Nota. Comparación de la estabilidad catalítica de los sistemas Y–Ni/S–B, Y–Ni/S–H y Y–Ni/S–Y durante el reformado seco de biogás a 700 °C durante 1800 min: (A) conversión de CH₄, (B) conversión de CO₂ y (C) rendimiento de H₂. Tomado de Moravvej et al. (2024).

