



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

APROXIMACIÓN AL ESTADO DEL ARTE DE LAS TECNOLOGÍAS ACTUALES PARA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE

Omar Eduardo Pachón Medina

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Química
Bogotá D.C., Colombia
2025

APROXIMACIÓN AL ESTADO DEL ARTE DE LAS TECNOLOGÍAS ACTUALES PARA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE

Omar Eduardo Pachón Medina

Trabajo final presentado como requisito parcial para optar al título de
Magister en Ciencias Químicas

Director:
Andrés Cabrera Orozco

Línea de Investigación
Energía Renovables - Hidrógeno
Grupo de investigación:
Laboratorio de Investigación en Combustible y Energía - LICE

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Química
Bogotá D.C., Colombia
2025

A mi familia

Agradecimientos

Al profesor Andrés Cabrera Orozco por su orientación, enseñanza y valiosos aportes en el desarrollo de este trabajo.

A mi familia por su amor, comprensión y apoyo necesario para cursar las asignaturas y actividades académicas de la Maestría en Ciencias - Química.

Resumen

Aproximación al estado del arte de las tecnologías actuales para la producción de hidrógeno verde

El hidrógeno verde, producido mediante procesos de electrólisis de agua, utiliza la electricidad generada por fuentes renovables como la solar y la eólica lo que resulta en una de las alternativas más prometedoras para la descarbonización de la economía global. A diferencia del hidrógeno gris, el hidrógeno verde no genera emisiones directas de gases de efecto invernadero durante su producción, lo que lo posiciona como un elemento fundamental en la transición hacia una economía baja en carbono. La creciente preocupación por el cambio climático y la búsqueda de soluciones sostenibles han acelerado la investigación y desarrollo de tecnologías eficientes para producir hidrógeno verde. Por esta razón, en el presente trabajo se revisan críticamente las tecnologías para la producción de hidrógeno verde enfocada en los tipos de electrolizadores, con el fin de comparar y analizar sus beneficios, efectividad y limitaciones.

Con el propósito de evaluar el potencial de esta tecnología para Colombia, se presentan generalidades de la hoja de ruta nacional y se compara con las estrategias adoptadas en otros países líderes, se identifican las oportunidades y desafíos específicos para su implementación y se mencionan factores como la disponibilidad de recursos renovables y las políticas públicas necesarias para impulsar el desarrollo del hidrógeno verde. Así mismo, se presentan los diversos usos del hidrógeno en sectores como la industria química, la refinación de hidrocarburos y el transporte. A su vez se analizan los posibles impactos ambientales y las afectaciones derivadas de la producción por los diferentes métodos revisados.

Finalmente, se revisan las tecnologías actuales para la producción de hidrógeno verde, con un enfoque en la electrólisis del agua. Se examinan cuatro tipos de electrolizadores: los alcalinos (AEL), los de membrana de intercambio de protones (PEM), los de óxidos sólidos (SOEC) y los de membrana de intercambio aniónico (AEM), haciendo énfasis en sus características, ventajas, desventajas, avances tecnológicos recientes y las áreas de investigación. Se realiza una comparación entre los electrolizadores y se examinan las perspectivas de la electrólisis en Colombia. Esta revisión resalta el potencial del hidrógeno como vector energético fundamental para la mitigación del cambio climático, la descarbonización de sectores difíciles de electrificar y su importancia como parte integral de la transición energética a nivel global y nacional.

Palabras clave: Hidrógeno verde, electrolizadores, transición energética

Abstract

Approach to the State of the Art of Current Technologies for Green Hydrogen Production

Green hydrogen, produced through water electrolysis, uses electricity generated from renewable sources such as solar and wind power, making it one of the most promising alternatives for decarbonizing the global economy. Unlike gray hydrogen, green hydrogen does not generate direct greenhouse gas emissions during its production, positioning it as a key element in the transition to a low-carbon economy. The growing concern about climate change and the search for sustainable solutions have accelerated research and development of efficient technologies for green hydrogen production.

For this reason, this study critically reviews technologies for green hydrogen production, focusing on different types of electrolyzers to compare and analyze their benefits, efficiency, and limitations. To assess the potential of this technology in Colombia, an overview of the national roadmap is presented and compared with strategies adopted by leading countries. Specific opportunities and challenges for its implementation are identified, along with factors such as the availability of renewable resources and the public policies needed to drive the development of green hydrogen. Additionally, the various applications of hydrogen in sectors such as the chemical industry, hydrocarbon refining, and transportation are explored. The possible environmental impacts and consequences of hydrogen production through different methods are also analyzed.

Finally, the study examines current technologies for green hydrogen production, with a focus on water electrolysis. Four types of electrolyzers are reviewed: alkaline (AEL), proton exchange membrane (PEM), solid oxide (SOEC), and anion exchange membrane (AEM), highlighting their characteristics, advantages, disadvantages, recent technological advancements, and research areas. A comparison of these electrolyzers is conducted, and the prospects for electrolysis in Colombia are evaluated. This review underscores the potential of hydrogen as a fundamental energy carrier for mitigating climate change, decarbonizing hard-to-electrify sectors, and its crucial role in the global and national energy transition.

Keywords: Green hydrogen, electrolyzers, energy transition

CONTENIDO

Introducción	10
1. Objetivos	13
1.1. Objetivo general	13
1.2. Objetivos específicos	13
2. Generalidades y perspectivas del uso del hidrógeno	14
2.1. Características fisicoquímicas del hidrógeno	14
2.2. Clasificación del hidrógeno por colores	15
2.3. El hidrógeno en la transición energética	16
2.4. Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia y otros países	18
2.4.1. Estrategia nacional de hidrógeno de Australia	19
2.4.2. Hoja de ruta de hidrógeno verde de Marruecos	20
2.4.3. Estrategia nacional de hidrógeno verde de Chile	20
2.4.4. Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia y perspectivas del hidrógeno verde	21
2.5. Afectación del hidrógeno sobre la capa de ozono	24
2.6. Impacto de la producción de hidrógeno verde en el Medio ambiente	25
3. Usos y métodos actuales de producción del hidrógeno	26
3.1. Usos del hidrógeno	26
3.1.1. Industria química	26
3.1.2. Refinación de hidrocarburos	28
3.1.3. Medios de transporte	29
3.2. Métodos de producción del hidrógeno	29
3.2.1. Métodos termoquímicos	29
3.2.2. Métodos electroquímicos	33
3.2.3. Métodos biológicos o bioquímicos	35
3.2.4. Métodos fotoquímicos y fotocatalíticos	36
4. Electrolizadores para la producción electroquímica de hidrógeno	36
4.1. Electrólisis	36
4.2. Tipos de electrolizadores	37
4.2.1. Electrolizador alcalino convencional (AEL)	37

4.2.2.	Electrolizador de membrana polimérica o de intercambio de protones (PEM)	40
4.2.3.	Electrolizador de estado sólido o de óxido sólido (SOEC)	44
4.2.4.	Electrolizador de membrana de intercambio aniónico (AEM)	50
4.3.	Comparación de las tecnologías de electrólisis del agua	54
4.4.	Perspectivas del uso de electrolizadores en Colombia	59
5.	Conclusiones	61
	Bibliografía	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Métodos de producción de hidrógeno y sus colores.	17
Figura 2.	Escalera del Hidrógeno limpio.	27
Figura 3.	Cadenas de valor de hidrógeno en la actualidad.	27
Figura 4.	Demanda anual mundial de hidrógeno desde 1975.	28
Figura 5.	Mecanismo de electrólisis del agua, para medios básicos y ácidos.	35
Figura 6.	Esquema general de un electrolizador.	38
Figura 7.	Representación de un electrolizador alcalino.	39
Figura 8.	Representación de partículas de Pt soportadas en C.	40
Figura 9.	Representación de un electrolizador PEM.	41
Figura 10.	Material nanoestructurado tipo Core-Shell RuO ₂ @IrOx.	43
Figura 11.	Catalizador tipo core-shell IrRux@Ir.	44
Figura 12.	Representación de nanobarras de WOx con película de Ir.	45
Figura 13.	Representación de un electrolizador SOEC.	46
Figura 14.	Representación de un electrolizador AEM.	52
Figura 15.	Representación de electrodos Ni-Fe soportados en Pt.	55
Figura 16.	LCOH para diferentes escenarios.	60
Figura 17.	Composición del LCOH para diferentes escenarios.	61

Lista de símbolos y abreviaturas

AEM: Electrolizador de membrana de intercambio aniónico.

AEL: Electrolizador alcalino convencional

Aliovalente: Dos átomos con diferentes cargas / valencias.

Área superficial electroquímica: (ECSA, por sus siglas en inglés: Electrochemical Surface Area) es la superficie efectiva de un material que está disponible para participar en reacciones electroquímicas por unidad de masa o volumen.

CAPEX: Costos de capital.

Capacidad Nm^3/h : cantidad de gas hidrógeno que el electrolizador puede producir en condiciones normales de temperatura y presión (Nm^3/h significa "metros cúbicos normales por hora").

Capas de transporte de protones: (PTL, por sus siglas en inglés: Proton Transport Layers) Estas capas tienen el propósito de facilitar el transporte de protones (iones de hidrógeno, H^+) a través de la membrana del electrodo mientras también contribuyen a la gestión del agua y la distribución de reactivos.

Capas microporosas (MPL, por sus siglas en inglés: Microporous Layer) son componentes fundamentales en la construcción de electrodos para celdas de combustible y sistemas de electrólisis.

Catalizadores PGM: (PGM: Platinum Group Metals). Son metales del grupo de platino que aumentan la velocidad de reacción. Dentro del grupo del platino, se encuentran seis metales: platino, paladio, rodio, rutenio, osmio e iridio, y se agrupan porque presentan propiedades físicas y químicas similares. Son utilizados para endurecer las aleaciones de platino, y en la fabricación de crisoles y contactos eléctricos de alta resistencia.

Cermet: es un compuesto formado por un material cerámico y un metal. El cerámico provee la resistencia al desgaste y el metal aporta la tenacidad.

CIOR: reacción de oxidación de cloruro.

Densidad de corriente: es una magnitud vectorial que relaciona unidades de corriente eléctrica por unidades de superficie (intensidad por unidad de área).

Eficiencia de Faraday (FE): es una medida que indica qué tan eficientemente los electrones transferidos durante una reacción electroquímica están siendo utilizados para llevar a cabo una reacción deseada. Se obtiene mediante la relación entre el volumen de hidrógeno producido en una celda experimental y el volumen de hidrógeno teórico producido durante el tiempo de prueba (flujo eléctrico).

Eficiencia de voltaje: se refiere a la capacidad de un sistema para mantener el voltaje de entrada y salida sin sufrir pérdidas significativas.

Eficiencia eléctrica: se refiere a la proporción de energía eléctrica que se convierte en trabajo útil, comparada con la energía total suministrada.

Eficiencia energética: es la relación entre la cantidad de energía útil que se obtiene de un sistema o proceso y la cantidad total de energía que se le suministra.

GWP: Potencial de calentamiento global.

HER: Hydrogen Evolution Reaction

HOR: Hydrogen Oxidation Reaction

Material catalítico: Son materiales que cumplen la función de catalizadores, está compuestos comúnmente de platino, rodio y paladio. Cuando ciertos gases se ponen en contacto con él, se generan y aceleran las reacciones químicas que descomponen y oxidan estos gases.

LCOH: Costo nivelado del hidrógeno

OER: Oxygen Evolution Reaction

OPEX: Costos de operación.

ORR: Oxygen Reduction Reaction

PEM: Electrolizador de membrana polimérica o de intercambio de protones.

Perovskita: es un material con estructura cristalina, similar a la del mineral perovskita (CaTiO_3), conocido por sus destacadas propiedades electrónicas, ópticas y magnéticas.

SOEC: Solid Oxide Electrolysis Cell (Celda de Electrólisis de Óxido Sólido)

SOFC: Solid Oxide Fuel Cell (Celda de Combustible de Óxido Sólido)

TLR: Nivel de madurez tecnológica.

WGS (water-gas shift reaction): Reacción de desplazamiento de agua y gas.

Introducción

El cambio climático y el calentamiento global son fenómenos estrechamente relacionados que han causado impactos, riesgos y vulnerabilidades crecientes en las sociedades, los ecosistemas y la biodiversidad. Se consideran una problemática climática y ambiental, asociada principalmente al consumo insostenible de los recursos no renovables, que conlleva a la pérdida de la biodiversidad de especies y ecosistemas, además de daños en la salud. Gran parte de esta problemática se debe a la emisión de gases de efecto invernadero, generados principalmente por la quema de combustibles fósiles, y las actividades de producción industrial. Es por esto que la lucha contra el cambio climático, el calentamiento global y en concordancia las emisiones de gases de efecto invernadero se han convertido en una prioridad mundial (Minenergía, 2022).

El Acuerdo de París, firmado en 2015, destaca la importancia de mantener el incremento de la temperatura global por debajo de los 2 °C, y enfatiza en la necesidad de trabajar para que este incremento no supere los 1,5 °C. De este modo, Colombia se ha comprometido a reducir sus emisiones en un 51% para el año 2030 en comparación con el escenario actual, con el propósito de lograr la neutralidad de carbono para 2050 (Minenergía, 2021).

A diferencia de los países desarrollados, Colombia no contribuye de manera sustancial a la formación y emisión de gases de efecto invernadero en el mundo. La mayoría de las emisiones no son generadas por la producción y consumo de energía, sino por el sector agrícola, forestal y el uso de suelos, es decir por la deforestación y la ganadería principalmente. Estas actividades responden por el 55% de las emisiones, en cambio, la producción y uso de la energía responde por el 35%. A pesar de este porcentaje, pese a que Colombia depende principalmente de energía hidroeléctrica convencional, mantiene una alta dependencia de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural (Cabral et al., 2022).

De este modo, tanto a nivel global como nacional en la actualidad se busca un cambio significativo en el sistema de producción, transporte, almacenamiento y consumo de energía, lo cual hace referencia a una transición energética. Los planes de dicha transición se encuentran enfocados en reducir las emisiones por fuentes de energía no renovables y mitigar los efectos del cambio climático (UPME, 2015). Según el Ministerio de Minas y Energía (2022), la transición energética en Colombia debe garantizar el acceso de las poblaciones a los recursos energéticos con precios justos. Además, debe propender por el respeto a la biodiversidad de ecosistemas y especies, buscando impactar en menor medida a la sociedad y el ambiente. Progresivamente, busca reemplazar una parte de las fuentes de energía fósil, con unas que generen menos contaminación como las renovables, con el fin de lograr una diversidad de fuentes de energía y asegurar la confiabilidad en el suministro energético, ante las condiciones de una demanda nacional creciente. Asimismo, vincula las instituciones de educación técnica, tecnológica y superior, junto con las entidades de investigación y desarrollo, con el propósito de fomentar los cambios estructurales necesarios para la transición energética, como la construcción y desarrollo de industrias nacionales asociadas a las energías renovables y una mayor eficiencia energética

en todos los sectores consumidores. Dicha transición energética puede representar una oportunidad para Colombia si ofrece beneficios para las poblaciones que no tienen acceso a los servicios energéticos, gestiona la demanda y aprovecha los potenciales energéticos locales con sistemas de mayor eficiencia. (MinAmbiente, 2020).

El hidrógeno es sin duda un protagonista de la transición energética por sus diversos campos de aplicación actual como la refinación del petróleo, la producción de fertilizantes y futuros como posible combustible para alimentar medios de transporte terrestres, marítimos y aéreos, así como como reactivo para la producción principalmente de amoníaco, metanol, acero, cemento, vidrio, cerámica y productos de petróleo refinado (MITERD, 2020). Es importante sin embargo resaltar que la producción de hidrógeno a partir de fuentes de energía renovable es muy costosa en la actualidad y por consiguiente este protagonismo dependerá de mejoras sustanciales de las tecnologías actuales para la producción y uso de este recurso a la par del avance de otros vectores energéticos que competirán por las mismas aplicaciones y campos de acción.

Recientemente se ha encontrado que el hidrógeno se puede encontrar en yacimientos geológicos en cantidades importantes, lo que permitiría una descarbonización a través de su explotación. No obstante, el potencial de formación y producción geológica de hidrógeno todavía es materia de estudio y se cree que hacen falta varios años para llegar a determinar con certeza la disponibilidad real de este recurso. Es por ello que la investigación sobre la producción de hidrógeno a partir de otras fuentes como combustibles fósiles, la biomasa o el agua siguen siendo pertinentes. (IEAGHG, 2024)

Sin embargo, la principal dificultad para producir hidrógeno se basa en la fuente o materia prima desde la cual se obtiene. Hoy en día, las principales fuentes para producir hidrógeno son los combustibles fósiles. Durante el año 2022, aproximadamente el 70% de las necesidades energéticas para producir hidrógeno se cubrieron con gas natural, cerca del 30% con carbón y menos del 1% a partir de electrólisis. (IEA, 2023a). Estos porcentajes se deben a que la producción de hidrógeno verde es un proceso costoso, requiere la generación de energía renovable, el uso de cantidades considerables de agua y la construcción e implementación de nuevas tecnologías en las industrias, como lo son los electrolizadores. (Bukowski, 2022).

En los últimos años, ha aumentado significativamente el interés por investigar y desarrollar tecnologías relacionadas con la electrólisis, debido a las perspectivas de instaurar centrales eléctricas apoyadas en fuentes de energía renovable a gran escala (Grigoriev et al., 2020). Sin embargo, el mayor desafío que presenta para su adopción y escalamiento sigue siendo el alto costo tanto de inversión como de operación, en comparación con los métodos que utilizan fuentes de energía fósil (Cavaliere et al., 2021). Cabe mencionar que en la actualidad se investigan otras rutas pero su nivel de madurez tecnológica es mucho menos avanzado que la electrólisis. En este sentido, debido a que la producción de hidrógeno verde resulta un proceso costoso, se hace indispensable investigar en nuevos materiales, diseños de electrodos y tecnologías de membrana, que mejoren la eficiencia de los electrolizadores y reduzcan sus costos de fabricación. Lo anterior, con el fin de aumentar el nivel de competitividad con respecto a los métodos tradicionales de obtención de hidrógeno.

Colombia, por su localización geográfica, tiene un alto potencial de generación de hidrógeno verde (Benalcazar & Komorowska, 2024). La implementación de electrolizadores en

Colombia estará influenciada por diversos factores, como la inversión inicial (CAPEX), de operación (OPEX), las dimensiones y capacidad requerida, así como el mantenimiento preventivo requerido. Así mismo, los recursos financieros limitados, la fuerte presencia de fuentes de energía tradicionales, como el carbón y el petróleo, y su capacidad de generación eléctrica, las políticas energéticas y las condiciones geográficas y climáticas determinarán y limitarán la implementación de esta tecnología. Además, el uso de electrolizadores requiere una infraestructura adecuada para su operación y mantenimiento, donde la falta de conocimiento sobre esta tecnología y sus beneficios potenciales podría ser un limitante para su adopción.

Por consiguiente, a medida que avanza el desarrollo de los electrolizadores para producción de hidrógeno es necesario investigar y analizar las tecnologías actuales que se implementan en el mundo, principalmente mediante los cuatro tipos de electrolizadores existentes con mayor nivel de madurez tecnológica (TRL): alcalinos (AEL), membrana de intercambio de protones (PEM), cerámica de óxido sólido (SOEC) y membrana de intercambio aniónico (AEM). Lo anterior, con el propósito de comparar y analizar los beneficios, la eficiencia, los costos y limitaciones de cada tipo de electrolizador en el contexto energético colombiano. En este sentido, el presente documento aborda las generalidades del hidrógeno, sus métodos de producción, su importancia en la transición energética, el impacto y las afectaciones de su producción y sus usos, y posteriormente presenta, compara y analiza las generalidades y características de los tipos de electrolizadores, las perspectivas de uso en Colombia y las hojas de ruta del hidrógeno en Colombia y otros países.

1.Objetivos

1.1. Objetivo general

Realizar una revisión bibliográfica sobre las tecnologías actuales para producción de hidrógeno verde enfocada en los tipos de electrolizadores, con el fin de comparar y analizar sus beneficios, efectividad y limitaciones en el contexto energético colombiano.

1.2. Objetivos específicos

- Revisar la literatura y estudios publicados sobre las generalidades del hidrógeno, sus usos, los métodos de producción, el impacto en el ambiente y su importancia en la transición energética.
- Describir las características de los tipos actuales de electrolizadores que se utilizan en la actualidad para la producción de hidrógeno y las perspectivas futuras de su desarrollo.
- Comparar y analizar la efectividad y los beneficios de los tipos de electrolizadores que se utilizan actualmente para la producción de hidrógeno.

2. Generalidades y perspectivas del uso del hidrógeno

2.1. Características fisicoquímicas del hidrógeno

El hidrógeno es el elemento químico más simple, pequeño, y por ende, abundante del universo, constituye aproximadamente el 75 % de la materia presente y se encuentra en mayor proporción en los planetas gaseosos y las estrellas. En el planeta Tierra, representa un 0,14% de la masa total, se puede encontrar un porcentaje en volumen del 0,00006 % en la composición de la atmósfera, pero por lo general se encuentra formando compuestos químicos como el agua, los hidrocarburos y/o demás compuestos orgánicos.

El hidrógeno se simboliza con la letra H, está ubicado en primer lugar en la tabla periódica, en el grupo uno y periodo uno, y a pesar de que se encuentra dentro del grupo de los metales alcalinos, el hidrógeno se clasifica como no metal. En condiciones normales de temperatura y presión, se encuentra en forma gaseosa como una molécula diatómica (H_2), incolora, inodora y no tóxica. El isótopo más abundante de este elemento se encuentra constituido por un protón y un electrón, lo cual hace que sea bastante ligero. El hidrógeno cuenta con una masa atómica de 1,00784 u, y debido a esto, presenta una densidad de 0,09 kg/m³ (Morante, et al. 2020).

Según la Asociación Nacional de Protección contra Incendios de Estados Unidos (NFPA) el hidrógeno no representa peligros considerables para la salud, puede causar mareo y somnolencia. Es una sustancia inflamable a temperatura ambiente y tiene un alto potencial para generar calor o explosión. Su reactividad es estable a condiciones normales, reacciona con el agua, puede formar mezclas explosivas con el aire (PRAXAIR, 2015). En la tabla 1 se presentan los datos fisicoquímicos del hidrógeno comparado con otros combustibles, como el diésel y el metano.

Tabla 1.

Características del Hidrógeno vs. Diesel y Metano.

Parámetros	Hidrógeno	Diesel	Metano
Densidad a STP (Kg/m ³)	0,089	830,0	0,720
Energía volumétrica a STP (MJ/m ³)	10,7	3,5x10 ⁴	33,0
Poder calorífico (MJ/Kg)	119,9	42,5	45,8

Punto de ebullición (K)	20,0	453-633	111,0
Temperatura de autoignición (K)	853	~523	813
Energía mínima de ignición en aire a 1 bar y estequiometría (mJ)	0,020	0,240	0,290
Relación estequiométrica en masa aire/combustible	34,4	14,5	17,2
Velocidad de llama laminar en aire a NTP (m/s)	1,85	0,37-0,43	0,38
Coeficiente de difusión en aire a temperatura ambiente (m ² /s)	85x10 ⁻⁷	-	19x10 ⁻⁷
Límites de inflamabilidad en el aire (%vol)	4-76	0,6-5,5	5,3-15
Temperatura de llama adiabática a NTP (K)	2480	~2300	2214

Tomado de Dash, Chakraborty & Elangovan (2023).

2.2. Clasificación del hidrógeno por colores

Según la Agencia Internacional de Energía (2019), en los últimos años se ha utilizado una taxonomía de colores para referirse a las fuentes de obtención del hidrógeno. Los colores “marrón”, “gris” o “negro” hacen referencia a la producción de hidrógeno a partir de lignito, gas natural y carbón, respectivamente. El color “azul” aplica a la producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles haciendo uso de procesos tecnológicos de captura y almacenamiento de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) (CCSU). El color “verde” hace referencia a la producción de hidrógeno a partir de la electricidad proveniente de fuentes de energía renovable. Para el hidrógeno producido a partir de biomasa, energía nuclear u otras variedades de energía no se han establecido colores. Debido a que la Agencia Internacional de Energía (IEA) utilizó esta taxonomía en su informe “The Future of Hydrogen” presentado en 2019, dicha distinción se ha hecho útil en términos técnicos y de divulgación, e incluso se han acuñado otros colores como por ejemplo el color “rosa” para hacer referencia a la producción de hidrógeno a partir de energía nuclear y el “turquesa” a partir de la pirólisis de metano. En la figura 1 se presentan los métodos de producción de hidrógeno y su clasificación por colores.

Según el artículo 5 de la Ley de Transición Energética 2099 de 2021 de Colombia, el hidrógeno verde se refiere al hidrógeno que se produce utilizando Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER). Estas fuentes incluyen, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, la biomasa, la energía eólica, la energía solar, el calor geotérmico, la energía mareomotriz, entre otras (Congreso de la República, 2021).

2.3. El hidrógeno en la transición energética

En la actualidad, a pesar del aumento y desarrollo de fuentes de energía renovable como la solar fotovoltaica, eólica, hidroeléctrica, y geotérmica, es evidente que la producción y consumo de energía se obtiene principalmente de los recursos fósiles como el petróleo, gas natural y carbón. Los compuestos que constituyen los recursos fósiles presentan gran contenido de carbono, hidrógeno, oxígeno y ciertas cantidades de otros elementos como nitrógeno y azufre, por ende, al momento de hacer uso de estos recursos se generan una gran emisión de gases como CO₂, CO, NO_x y SO_x, hacia el ambiente.

De acuerdo con el consumo energético mundial, el petróleo cubre el 51%, el gas natural el 16% y el carbón el 2%. Por tanto, se puede decir que la emisión de gases es producida en mayor medida por estos recursos. Por consiguiente, es importante seguir impulsando las fuentes de energías renovables y reducir el dominio de las fuentes fósiles (Gulli et al., 2023).

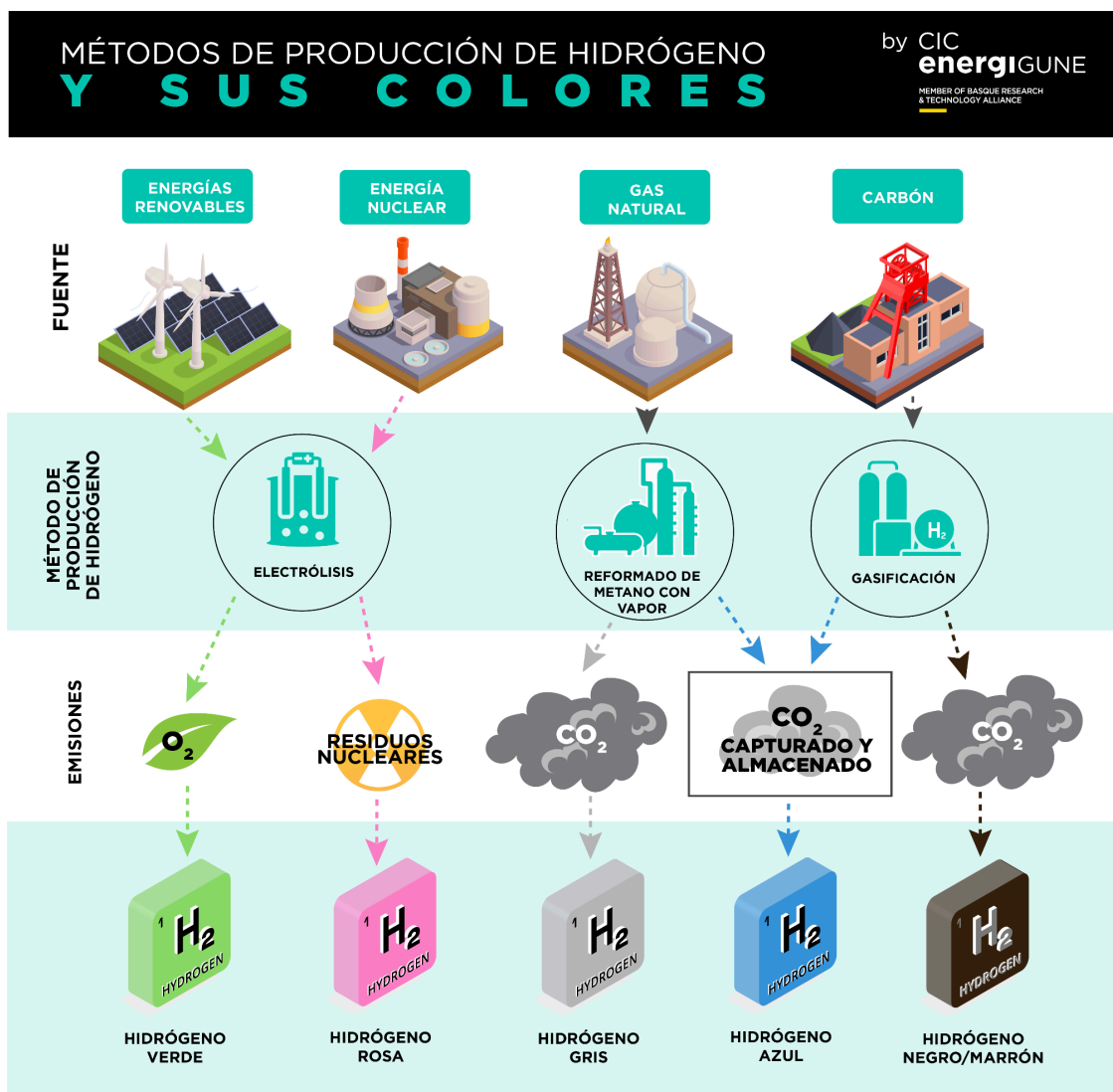


Figura 1. Métodos de producción de hidrógeno y sus colores. Adaptado de (Kilner, 2022).

El hidrógeno verde al ser un gas que proviene de recursos naturales renovables, no implica ningún tipo de emisión de CO_2 , CO y NO_x , y se puede considerar como una alternativa viable para contribuir en la transición energética. Es un combustible seguro, tanto, que puede ser comparado con el gas natural. Adicionalmente, hace varias décadas ha sido utilizado a nivel mundial en la industria química y petroquímica, por lo tanto, contrario a lo que la opinión pública cree, la tecnología para su manejo a nivel industrial está completamente desarrollada (IEA, 2019).

Kovač, Paranos, & Marciuš (2021) analizan el creciente papel del hidrógeno verde en la construcción de una sociedad futura carbono-neutral. Afirman que es indispensable incorporar la tecnología del hidrógeno en las estrategias de transición energética, para un futuro neutro en carbono. El crecimiento significativo del mercado del hidrógeno demuestra que la confianza en el desarrollo de la tecnología del hidrógeno está bien fundamentada. El enfoque principal se centra en resolver la legislación, asegurar mercados adecuados, preparar industrias y economías para el crecimiento de los sistemas basados en hidrógeno

y promover la interconexión y cooperación global. Los principales desafíos de la transición energética podrían estar asociados a la preparación de la sociedad para la presencia y aplicación del hidrógeno en la vida cotidiana. Según las estrategias y predicciones de varios gobiernos, los sistemas y aplicaciones basados en el hidrógeno podrían, en un tiempo relativamente corto, expandir significativamente su presencia en el mercado.

Hoy en día países como Japón, Alemania y Estados Unidos, son líderes en la utilización del hidrógeno ya que fueron los primeros en reconocer la necesidad ambiental, y su potencial económico. Debido a su tendencia de desarrollo positiva, otros países podrían alcanzar el estado actual de dichos líderes, lo cual podría facilitar el camino para el resto de los países, que están en el inicio de la transición o aún no la han comenzado. Un ejemplo relevante es Croacia, que actualmente está llevando a cabo el proceso de transición energética, implementando su estrategia de hidrógeno. Si una fracción de las estrategias actuales se materializa para 2030, el impacto en la población será muy significativo, lo que conllevará a la consolidación del hidrógeno como parte esencial de un futuro verde y neutro en carbono (Kovač, Paranos, & Marciuš, 2021).

Finalmente, países como Australia pueden ser modelos para seguir pues poseen un gran potencial en energías renovables, destacando por sus niveles de radiación solar, que superan el promedio mundial, así como por contar con diversas zonas de gran potencial eólico. El país tiene un considerable potencial geotérmico en el centro y el norte, junto con la posibilidad de aprovechar la energía mareomotriz de los océanos circundantes y otras fuentes como la energía hidroeléctrica y la bioenergética. Sumado a sus abundantes recursos naturales, Australia dispone de las capacidades necesarias para desarrollar una industria del hidrógeno, tanto a nivel nacional como para exportación, de manera económica y sostenible, lo que le permitiría cumplir con sus objetivos de reducción de emisiones y mejorar su seguridad energética. (Milani, Kiani & McNaughton, 2020).

2.4. Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia y otros países

Según Benalcazar & Komorowska (2024) investigaciones recientes han señalado a Australia, Marruecos, Chile y Colombia como los países con mayor potencial para convertirse en los principales exportadores mundiales de hidrógeno en los próximos años. Esto pone de manifiesto la necesidad que tiene nuestro país de investigar a fondo las oportunidades y limitaciones de las tecnologías asociadas.

La estrategia de Australia incluye la creación de centros de producción, y su meta para 2030 es ser un destacado actor global con exportaciones hacia mercados asiáticos. Por otra parte, Marruecos planea convertirse en un importante socio estratégico para Europa. Chile, gracias a la alta radiación solar del desierto de Atacama y potencial eólico de la región de la Patagonia, pretende instalar al menos 25 GW de capacidad de electrolizadores para 2030, convirtiéndose en un líder exportador con los costos de producción más bajos a nivel mundial. En cuanto a Colombia, su política energética refleja la importancia del hidrógeno

verde en el desarrollo de una economía de exportación baja en carbono. Su ubicación con acceso tanto al Océano Atlántico como al Pacífico, le permite realizar exportaciones hacia los mercados de ambos océanos. A continuación, se presentará la estrategia del hidrógeno para estos países con el fin de compararla con la hoja de ruta colombiana.

2.4.1. Estrategia nacional de hidrógeno de Australia

Según Council of Australian Governments (2019) la Estrategia Nacional de Hidrógeno de Australia fue lanzada en 2019 por el gobierno australiano para ubicar al país como un líder mundial en la producción y exportación de hidrógeno para 2030. El objetivo de esta estrategia consiste en desarrollar la industria del hidrógeno en Australia a través de la creación de centros de producción que faciliten la colaboración entre el sector industrial, el gobierno y la academia.

Algunos componentes clave de la estrategia son:

- Desarrollo de infraestructura necesaria para la producción, transporte y uso de hidrógeno, incluyendo la construcción de plantas de hidrógeno, puertos de exportación, y estaciones de servicio.
- Establecimiento de un marco regulatorio claro que garantice la seguridad y eficiencia de la industria del hidrógeno, así como la creación de estándares nacionales para la producción y uso de hidrógeno.
- Fomento de la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías para mejorar la eficiencia y reducir los costos de producción de hidrógeno.
- Promoción de Australia como proveedor de hidrógeno a nivel mundial, con énfasis en los mercados asiáticos, como Japón y Corea del Sur, que están invirtiendo en la transición a energías más limpias.
- Integración del hidrógeno como parte de la transición de Australia hacia una economía baja en carbono, aprovechando las fuentes de energía renovable, como la solar y eólica, para la producción de hidrógeno verde.
- Colaboración internacional: Establecimiento de alianzas estratégicas con otros países para impulsar el desarrollo y adopción del hidrógeno a nivel global.

La estrategia busca no solo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sino también crear nuevas oportunidades económicas y de empleo en Australia, especialmente en las regiones rurales y remotas (Council of Australian Governments, 2019). Sin embargo, la Revisión de la Estrategia Nacional de Hidrógeno de Australia publicada en 2023, actualiza la versión inicial de 2019 para abordar los cambios que han surgido en la industria del hidrógeno. Esta revisión enfatiza en la necesidad de aumentar la producción y el uso de hidrógeno para apoyar la transición energética hacia una economía baja en carbono. Para ello, especifica planes para desarrollar la infraestructura de hidrógeno, las instalaciones de

producción, redes de distribución y terminales de exportación, para facilitar el crecimiento de la industrial. De este modo, apoya la investigación y el desarrollo de tecnologías de hidrógeno para mejorar la eficiencia y reducir costos, lo cual garantiza que Australia siga siendo competitiva en el mercado mundial del hidrógeno. Por otra parte, menciona la necesidad de establecer marcos regulatorios claros para apoyar la producción, transporte, y uso seguro y eficiente del hidrógeno. La estrategia actualizada busca expandir el mercado doméstico, promoviendo su uso en varios sectores, como medios de transporte y la generación de energía. Finalmente, destaca la importancia de colaborar con otros países en el desarrollo de cadenas de suministro y estándares internacionales de hidrógeno (Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water, 2023).

2.4.2. Hoja de ruta de hidrógeno verde de Marruecos

La Hoja de Ruta de Hidrógeno Verde de Marruecos se centra en el potencial del país para ser un líder mundial en la producción de hidrógeno verde. La estrategia considera la abundante disponibilidad de recursos de energía renovable, como la solar y eólica, que son necesarios para producir hidrógeno verde. Marruecos tiene el objetivo de desarrollar una robusta infraestructura de hidrógeno verde, destinada al consumo interno y la exportación. Busca apoyarse de su proximidad a Europa para convertirse en un proveedor clave de hidrógeno, ayudando a satisfacer la creciente demanda de energía limpia en el continente. Asimismo, tiene en cuenta el uso de este gas dentro de industrias existentes, como las productoras de amoníaco y acero, y el fomento de nuevas industrias basadas en tecnologías de hidrógeno. El país ha establecido un proceso detallado para la selección de inversores interesados en sus proyectos. Dichos inversores deben presentar ofertas a la Agencia Marroquí de Energía Sostenible, especificando su capacidad financiera y el impacto anticipado de sus proyectos. La estrategia incluye incentivos fiscales y arancelarios y están diseñados para atraer proyectos que generen empleo, contribuyan a la seguridad energética y apoyen el desarrollo de tecnologías avanzadas (Xunta de Galicia, 2022).

Según la Xunta de Galicia (2022) Marruecos no solo busca descarbonizar su propia economía, sino también ubicar al país como un centro regional para la producción de energía renovable. Con el apoyo de organizaciones internacionales y la creación de políticas favorables, Marruecos se encuentra bien posicionado para liderar el desarrollo de hidrógeno verde en África.

2.4.3. Estrategia nacional de hidrógeno verde de Chile

La Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde de Chile establece el plan del país para convertirse en un actor clave en la producción de hidrógeno verde, mediante el aprovechamiento de sus abundantes recursos renovables. Su objetivo principal es posicionarse como uno de los principales países exportadores de hidrógeno verde para

2040 y como el productor más barato a nivel mundial para 2030. Chile tiene un gran potencial para generar hidrógeno verde debido a sus condiciones ideales para obtener energía solar y eólica, especialmente al norte y sur del país, en el desierto de Atacama y la Patagonia, respectivamente. Asimismo, busca utilizar el hidrógeno verde en diversas áreas, como la descarbonización de la industria minera, la producción de fertilizantes, la exportación de amoníaco, y en el transporte, tanto interno como para exportación. Esta estrategia también pretende contribuir con los compromisos climáticos del país, reduciendo las emisiones de carbono y acelerando la transición energética hacia fuentes limpias y renovables.

Chile prevé un aumento significativo en la inversión para infraestructura, tecnología y capacitación de profesionales, mediante la creación de alianzas públicas y privadas para acelerar la adopción del hidrógeno verde. De este modo, el país plantea a largo plazo la posibilidad de exportar hidrógeno a mercados como Asia, Europa y Norteamérica, gracias a sus bajos costos de producción (Ministerio de Energía-Gobierno de Chile, 2020).

Jiménez (2020) en su trabajo analiza el proceso de abastecimiento del hidrógeno verde en Chile desde su producción hasta su consumo final. En cada proceso detalla las alternativas fundamentales asociadas, y contrasta las características para encontrar alternativas con mayor rentabilidad y aplicabilidad en las industrias. En primera instancia, presenta los antecedentes preliminares sobre el suministro y usos del hidrógeno verde. A continuación, analiza la demanda de hidrógeno a nivel nacional e internacional, junto con la demanda potencial a mediano y largo plazo. Realiza una proyección económica para el abastecimiento de hidrógeno verde e incluye el precio que debería alcanzar para garantizar su rentabilidad frente a las fuentes de energía actuales. Evalúa los factores técnicos y económicos que intervienen en las plantas prototipo de Chile con mayor potencialidad, y realiza una proyección de mercado considerando la factibilidad, aplicación y costos. Por último, concluye que Chile dispone de las condiciones necesarias para producir hidrógeno verde a gran escala, el cual podría ser utilizado en diferentes procesos industriales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero e incrementar la eficiencia de los ciclos de producción. De tal modo, se podría alcanzar una mayor estabilidad económica, independiente de combustibles internacionales, e incluso exportar energía mediante el uso de hidrógeno verde como vector energético.

2.4.4. Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia y perspectivas del hidrógeno verde

La Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia es un documento que define el plan de acción del país para desarrollar una industria sostenible centrada en la producción, uso y exportación de hidrógeno, con el fin de contribuir a una transición energética. Este plan está enfocado en la descarbonización y crecimiento económico del país, y enmarca el potencial de Colombia para aprovechar energías renovables como la solar, eólica e hidroeléctrica en la producción de hidrógeno verde y azul. Colombia pretende ser un líder en la producción de hidrógeno bajo en carbono (verde y azul), con miras a la exportación y el uso en sectores

estratégicos como la industria y el transporte. Asimismo, resalta el potencial para descarbonizar sectores industriales intensivos en energía, como la producción de acero, cemento y productos químicos (Ministerio de Minas y Energía-República de Colombia, 2021).

El documento visualiza la importancia del hidrógeno en el sector de transporte, como en autobuses, camiones, aviones y barcos. Además, pretende explorar el uso de hidrógeno para almacenar energía y generar electricidad en centrales de respaldo. Asimismo, busca que Colombia se convierta en un exportador de hidrógeno hacia mercados internacionales, principalmente Europa y Asia, donde existe una creciente demanda de hidrógeno limpio. Colombia planea aprovechar su ubicación geográfica y sus recursos naturales para competir a nivel global. Sin embargo, la implementación de la hoja de ruta depende de barreras tecnológicas, económicas y regulatorias. El desarrollo de la infraestructura para la producción, almacenamiento y transporte de hidrógeno aún está en proceso y requiere una gran inversión. Además, necesitan marcos regulatorios que promuevan la inversión en investigación y desarrollo, infraestructura y capital humano capacitado (Ministerio de Minas y Energía-República de Colombia, 2021).

La hoja de ruta considera que desarrollar una economía de hidrógeno en Colombia podría generar diversas oportunidades económicas, como el valor añadido del hidrógeno y la generación de empleo en áreas de construcción de infraestructura, innovación, tecnológica y nuevos mercados de exportación. Para ello, Colombia buscará alianzas con otros países y organismos internacionales para obtener financiamiento y tecnología avanzada. El documento presenta un enfoque integral para que Colombia desarrolle una economía del hidrógeno competitiva y sostenible, alineada con sus compromisos climáticos y de desarrollo económico (Ministerio de Minas y Energía-República de Colombia, 2021).

Castiblanco y Cárdenas (2020) en su trabajo presentan una revisión sobre la producción de hidrógeno, su uso en el contexto energético e industrial, y la perspectiva de su implementación en Colombia. Para ello, consideran factores económicos, ambientales, sociales, tecnológicos, e indagan sobre la confiabilidad de los métodos de producción. De acuerdo con su perspectiva, el hidrógeno es fundamental para un futuro sostenible, ofrece beneficios ambientales, económicos y sociales, además de contribuir a la seguridad energética nacional. Sin embargo, resaltan la importancia de desarrollar mayores investigaciones e inversiones en los sistemas de producción de hidrógeno, con el fin de desarrollar infraestructuras adecuadas que aumenten la capacidad de producción y reduzcan costos, lo que conduciría a una gran aceptación por parte del gobierno y su población. Además, argumentan que Colombia cuenta con los suficientes recursos hidroeléctricos (11 GW) que incrementan la viabilidad técnica, económica y ambiental para producir hidrógeno desde esta fuente de energía renovable. Asimismo, la energía solar puede ayudar al hidrógeno a incorporarse en la cadena energética mediante procesos electrolíticos y termoquímicos, debido a que se encuentra ampliamente disponible y distribuida (4,5 kWh/m²). Finalmente mencionan que, para desarrollar una transición energética más rápida desde los combustibles fósiles a las energías renovables, se debe disponer de sistemas de producción de hidrógeno renovables, fiables, asequibles, eficientes, limpios y a mayores escalas.

Martínez (2023) en su artículo analiza de manera prospectiva los argumentos sobre el hidrógeno verde como vector energético del futuro, sus aspectos técnicos, económicos, regulatorios y los modelos de desarrollo de mercado. Para ello, realizó una investigación de tipo documental interpretativa–comprensiva a partir de diversas fuentes de información, utilizó los métodos de análisis y síntesis, de análisis estructural prospectivo, deducción, inducción y revisión bibliográfica. Como resultado concluye que el hidrógeno verde es uno de los principales vectores de la transición energética a medio y largo plazo, puesto que su producción y consumo no genera gases de efecto invernadero y de este modo, aunque no es una fuente energética, puede transportar y almacenar energía, como la eléctrica. Sin embargo, los principales retos que enfrenta son los costos de producción elevados, la falta de infraestructuras adecuadas, la baja eficiencia en procesos de operación y conversión, y la actual dependencia de electricidad de origen no renovable para garantizar su producción.

Muñoz, Beleño, & Díaz (2022) en su artículo analizan el aporte potencial del hidrógeno (H_2) verde para reducir emisiones durante un año en cuatro sectores de Colombia: transporte, red de gas natural, generación eléctrica en zonas no interconectadas y tratamiento de crudo en refinerías. Para ello, determinan la capacidad de producir hidrógeno verde mediante dos modelos de electrolizadores (PEM y alcalino) con potencias similares. La capacidad de producción de hidrógeno obtenida con el modelo PEM fue de 1.251 tH_2 /año, y con el modelo AEL 1.673 tH_2 /año, con 10 MW de capacidad de electrólisis. De acuerdo con lo anterior, consideran el consumo de combustible fósil en cada sector, y evalúan el suministro de hidrógeno verde en el que se evidencia un porcentaje cercano al 1% respecto a la demanda total del combustible fósil en el país. Adicionalmente, al cuantificar las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) con el uso del H_2 en cada sector, se encontraron reducciones entre 3.000 y 37.000 toneladas de CO_2 dependiendo del segmento productivo evaluado.

Por otra parte, es importante señalar que descubrimientos recientes han revelado el gran potencial del hidrógeno blanco como una fuente de energía limpia y sostenible. Según el Servicio Geológico Colombiano (2023) el hidrógeno blanco es la única clasificación de hidrógeno que se produce naturalmente bajo la superficie terrestre, principalmente, a través de la interacción del agua con las rocas. Recientemente ha ganado interés, por su potencial para ayudar a descarbonizar industrias y mitigar el calentamiento global. A diferencia del hidrógeno gris, que se obtiene de hidrocarburos y tiene un alto contenido de dióxido de carbono, y del hidrógeno verde, que es costoso de producir, el hidrógeno blanco se forma naturalmente, reduciendo costos e impacto ambiental.

Para extraer el hidrógeno blanco, es necesario realizar perforaciones en el subsuelo, y se ha comprobado que la duración de un pozo es prolongada. Es el caso de Malí, un país de África que cuenta con un depósito de hidrógeno blanco, el cual han utilizado para obtener electricidad durante los últimos 10 años. El depósito se recarga constantemente y la presión se ha mantenido estable, demostrando que la extracción de hidrógeno en el subsuelo es sostenible y rápida a lo largo del tiempo. Además de Malí, otros países como Australia y Francia, Brasil, Rusia, Estados Unidos, Sudáfrica, Namibia, Marruecos y España tienen potencial y están avanzando en la explotación del hidrógeno blanco. En Colombia, especialmente en el Valle del Cauca, aunque aún no se ha confirmado la existencia de un yacimiento, varias investigaciones han identificado rocas que pueden generar hidrógeno (Servicio Geológico Colombiano, 2023).

Estos hallazgos destacan la posible contribución del hidrógeno blanco en la transición energética y su correspondiente disminución de la dependencia de los combustibles fósiles. No obstante, aún queda un largo camino para comprender completamente su viabilidad a gran escala, debido a que es necesario realizar más investigaciones sobre su accesibilidad, reservas y tecnologías asociadas para su extracción eficiente. Asimismo, la implementación de este recurso en el mercado energético requiere de más estudios que evalúen tanto su impacto económico como ambiental a largo plazo (IEAGHG, 2024).

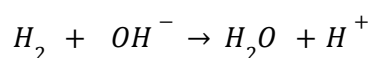
2.5. Afectación del hidrógeno sobre la capa de ozono

Con el creciente interés mundial en el hidrógeno molecular para reemplazar a los combustibles fósiles, se está prestando más atención a las posibles fugas de hidrógeno a la atmósfera y sus consecuencias ambientales. El hidrógeno no es directamente un gas de efecto invernadero, pero sus reacciones químicas cambian las abundancias de los gases de efecto invernadero metano, ozono y vapor de agua estratosférico, así como aerosoles (Sand et al., 2023).

Cuando se realiza la producción, transporte, almacenamiento y uso del hidrógeno, una parte de este gas puede escapar hacia la atmósfera. Actualmente, existen pocos datos sobre el volumen de estas fugas en las cadenas de suministro, y se desconoce el cambio de estas emisiones en el futuro, conforme crezca la economía basada en hidrógeno. Las concentraciones actuales de hidrógeno en la atmósfera, basadas en estimaciones y mediciones, alcanzan aproximadamente 530 ppbv (Patterson et al., 2020).

Cabe mencionar que cualquier modificación en los sistemas terrestres altera la química de la troposfera y puede desencadenar una cadena compleja de eventos que alteran componentes atmosféricos con propiedades radiactivas, como el metano, el ozono y los aerosoles, lo que afecta el equilibrio energético de la Tierra. El hidrógeno influye en reacciones químicas en la atmósfera que impactan la duración y concentración de otros gases que afectan el clima, por lo que se le puede considerar como un gas de efecto invernadero indirecto (Sand et al., 2023).

Existen cuatro efectos climáticos clave asociados con el aumento de los niveles de hidrógeno: (1) una mayor duración y concentración del metano, (2) un incremento en la producción de ozono en la troposfera y alteraciones en el ozono estratosférico, (3) un aumento en la generación de vapor de agua en la estratosfera y (4) cambios en la producción de ciertos aerosoles. La principal reacción responsable de estos efectos es la destrucción del hidrógeno a través de radicales hidroxilo (OH^\cdot) (Patterson et al., 2020).



Warwick et al. (2023) utilizan el modelo químico-climático UK Earth System Model (UKESM1) para examinar la composición atmosférica y los efectos climáticos de un aumento en la concentración de hidrógeno en la atmósfera. Los incrementos en los niveles de hidrógeno conducen a mayores concentraciones de metano, ozono troposférico y vapor de agua estratosférico, generando un forzamiento radiativo positivo. Sin embargo, algunos de los efectos causados por las fugas de hidrógeno pueden ser parcialmente mitigados por la reducción de emisiones de gases como metano, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles debido al menor uso de combustibles fósiles. Asimismo, los autores desarrollaron una metodología para estimar los potenciales de calentamiento global (GWP) indirectos, aplicable para especies de vida corta, media o larga, como el hidrógeno. Con esta metodología, determinaron que el hidrógeno tiene un GWP de 100 años de 12 ± 6 . Teniendo en cuenta este GWP y fugas de hidrógeno entre el 1% y el 10%, encontraron que las fugas compensarían aproximadamente entre el 0,4% y el 4% de las reducciones de emisiones equivalentes de CO₂. Por consiguiente, consideran que para optimizar el uso del hidrógeno como fuente de energía, es fundamental minimizar tanto las fugas de hidrógeno como las emisiones de gases precursores del ozono.

En esta misma línea, Sand et al. (2023) utilizaron un conjunto de cinco modelos globales de química atmosférica para calcular el GWP del hidrógeno en un periodo de 100 años, donde encontraron un valor de $11,6 \pm 2,8$, considerando una desviación estándar. Este rango de incertidumbre toma en cuenta varios factores, como la absorción de hidrógeno por el suelo, su producción fotoquímica, las vidas medias tanto del hidrógeno como del metano, y la retroalimentación de radicales hidroxilo en ambos gases. Los autores encontraron que los cambios en la atmósfera provocados por el hidrógeno muestran consistencia en los distintos modelos. Por consiguiente, consideran que es importante minimizar las fugas de hidrógeno para maximizar los beneficios de una transición hacia una economía basada en este gas.

2.6. Impacto de la producción de hidrógeno verde en el Medio ambiente

La producción de hidrógeno verde tiene múltiples impactos en el medio ambiente, tanto positivos como negativos. Aunque el proceso de electrólisis a gran escala implica un uso considerable de agua (9 toneladas de agua pura por tonelada de hidrógeno producido), este consumo es mínimo en comparación con el agua utilizada globalmente para otros sectores económicos como la agricultura. No obstante, en regiones con altos niveles de estrés hídrico, es crucial evaluar detenidamente su viabilidad pues este consumo entraría a competir por el consumo humano y agrícola. Asimismo, a pesar de que la transición hacia energías limpias podría reducir notablemente la actividad minera en general, la producción de hidrógeno verde y el uso de energías renovables exigen una cantidad significativa de metales. Debido a que los metales necesarios para la construcción de electrolizadores se concentran en países específicos, se debe analizar el riesgo de suministro de estos materiales antes de impulsar la tecnología de producción de hidrógeno verde. De igual forma, la toxicidad y los impactos ambientales de la minería y la producción de metales

podrían minimizarse mediante mejores tecnologías y prácticas de gestión. Por consiguiente, es necesario realizar evaluaciones sobre las tecnologías específicas de producción de hidrógeno y sus efectos ambientales para anticipar y mitigar posibles impactos negativos tanto a nivel local como global (Wei et al., 2024).

3. Usos y métodos actuales de producción del hidrógeno

3.1. Usos del hidrógeno

Según el Servicio Geológico Colombiano (2023) el hidrógeno tiene una gran variedad de aplicaciones. Desempeña un papel crucial como ingrediente principal en fertilizantes, que son esenciales para la producción de alimentos a nivel mundial. También se emplea en productos médicos y en la fabricación de derivados del petróleo, como la gasolina. Adicionalmente, su potencial como vector energético para el transporte de carga en trenes, barcos y aviones comienza a ser explorado, aunque este tipo de aplicaciones está en directa competencia con otros vectores energéticos.

La figura 2 presenta la versión 5.0 de la "Escalera del Hidrógeno" desarrollada por Liebreich Associates, la cual clasifica los potenciales usos del hidrógeno de acuerdo a su viabilidad y competitividad, en comparación con otras tecnologías energéticas. La escalera está organizada en niveles, los cuales van desde usos "inevitables" (A) hasta "no competitivos" (G). En los niveles superiores, se encuentran sectores donde el hidrógeno es esencial debido a la falta de alternativas viables, como la producción de fertilizantes, refinación, hidrocrackeo y desulfurización. A medida que se desciende en la clasificación, se relacionan usos menos eficientes o donde otras soluciones, como la electrificación mediante baterías o el uso de biocombustibles, resultan más competitivas. Los colores codifican las alternativas tecnológicas que pueden reemplazar al hidrógeno, destacando su papel en la transición energética. Asimismo, es importante destacar que estas posibles aplicaciones se basan en el desarrollo tecnológico y económico actual de la industria del hidrógeno. Es decir, que si en el futuro se dan escenarios positivos en cuanto a una reducción significativa del costo de producción, almacenamiento y transporte, esto podría llevar a que el hidrógeno ocupe nuevos nichos como el transporte de carga o la generación de calor a nivel industrial.

Escalera del Hidrógeno Limpio: Tecnologías Competitivas

Liebreich Associates

Inevitable

Llave:

Sin alternativa real

Electricidad/baterías

Biomasa/biogás

Otros



Figura 2. Escalera del Hidrógeno limpio. Adaptado de (Liebreich M, 2023)

3.1.1. Industria química

El hidrógeno juega un papel fundamental en la industria, ya que se emplea como reactivo en la fabricación de una variedad de compuestos, tales como el metanol, amoníaco, en la refinación de petróleo, en la producción de peróxido de hidrógeno, entre otros. Actualmente, la mayor parte del hidrógeno industrial se obtiene de combustibles fósiles. En 2022, de las 115 millones de toneladas de hidrógeno consumidas, aproximadamente el 33% se utilizó para la refinación de crudo, 27% para la producción de amoníaco, 10% para la producción de metanol y 3% para la reducción directa de hierro y acero (IEA, 2023b). En la figura 3 se presentan las cadenas de valor de hidrógeno en la actualidad.

Las cadenas de valor del hidrógeno actuales

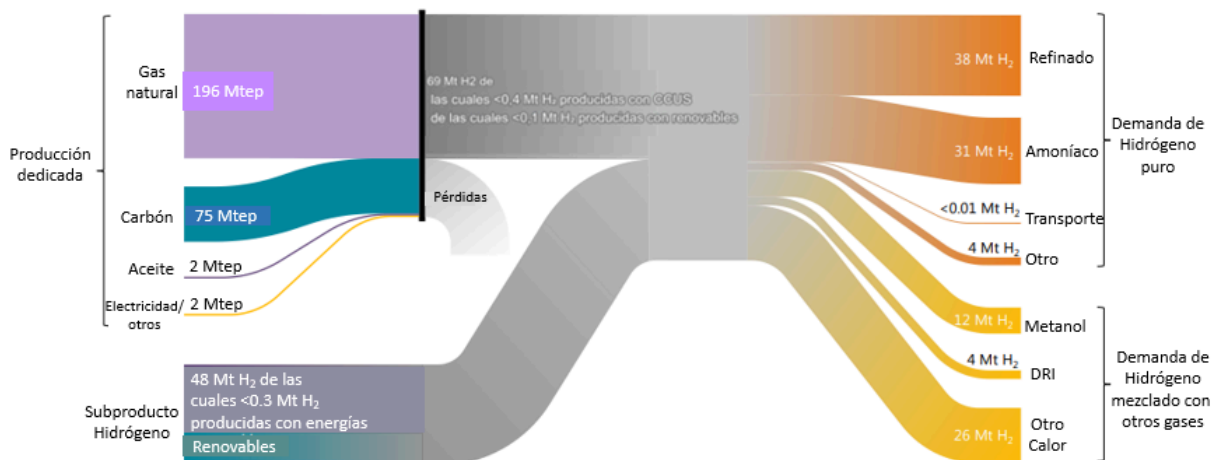


Figura 3. Cadenas de valor de hidrógeno en la actualidad. Adaptado de (IEA, 2019).

Notas: Otras formas de demanda de hidrógeno puro incluyen las industrias química, metalúrgica, electrónica y vidriera. Otras formas de la demanda de hidrógeno mezclado con otros gases (por ejemplo, monóxido de carbono) incluye la generación de calor en las acerías, y gases subproductos de los craqueadores de vapor. Las cuotas de producción de hidrógeno basadas en energías renovables se calculan utilizando la cuota de la electricidad renovable en la generación eléctrica mundial. La proporción de hidrógeno dedicado producido con CCUS se estima en función de instalaciones existentes con almacenamiento geológico permanente, suponiendo una tasa de utilización del 85%. Se hacen varias estimaciones en cuanto a la participación de subproductos y generación dedicada en diversos usos finales, mientras que la energía de entrada para la producción de subproductos se supone igual al contenido energético del hidrógeno producido sin asignación adicional. Todas las cifras mostradas son estimaciones para 2018. El espesor de las líneas en el diagrama de Sankey se dimensionan según el contenido de energía de los flujos representados.

Actualmente, se producen aproximadamente 170 millones de toneladas de amoníaco (NH_3) al año. El método para su producción, conocido como el proceso Haber-Bosch, fue desarrollado por Fritz Haber en 1909. Este proceso implica la reacción del nitrógeno del aire con hidrógeno bajo condiciones de alta presión y temperatura. El principal gasto en la producción de amoníaco proviene del hidrógeno, que se obtiene mayoritariamente del carbón y el gas natural, representando el 22% y el 72% de la producción global de amoníaco, respectivamente (Liu et al., 2020). Asimismo, es importante mencionar que el amoníaco puede ser producido con el hidrógeno obtenido de la electrólisis del agua desarrollada a partir de electricidad proveniente de fuentes renovables. De este modo, el amoníaco se determina como un recurso renovable, conocido a su vez como amoníaco verde, y puede ser utilizado en diversas aplicaciones, como fertilizantes, el almacenamiento de hidrógeno, uso medicinal y otras áreas (Amin et al., 2023). Así mismo, el amoníaco se puede utilizar como combustible en ámbitos específicos, como la producción de electricidad y el transporte marítimo. El amoníaco proveniente de hidrógeno verde es una alternativa energética sin emisiones de carbono, con una elevada densidad energética por volumen, la cual es casi el doble de la del hidrógeno en estado líquido (Liu et al., 2020).

Por otra parte, en la generación de metanol se emplea gas de síntesis, una mezcla que incluye H_2 , CO y CO_2 . Para ello, se realiza la hidrogenación directa de CO_2 , para transformarlo directamente en compuestos orgánicos mediante la reducción con hidrógeno. En este proceso se utilizan catalizadores metálicos ($\text{ZnO}/\text{CuO}/\text{Al}_2\text{O}_3$) para facilitar y acelerar la reacción química. Es crucial utilizar hidrógeno derivado de fuentes de energía renovables en la síntesis del metanol para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Aunque el metanol puede convertirse fácilmente en hidrógeno, este proceso resulta costoso. El metanol tiene diversas aplicaciones, como materia prima en la producción de pinturas, refrigerantes para vehículos y muchos otros compuestos químicos (Amin et al., 2023).

La producción de hidrógeno ha aumentado constantemente durante los últimos cincuenta años, siendo las aplicaciones con mayor crecimiento la refinación de hidrocarburos y la producción de amoníaco. Se espera que a medida que nuevos procesos como la reducción directa de óxidos metálicos se realicen con hidrógeno, esta demanda aumente a un mayor ritmo durante los próximos años. En la figura 4 se observa la demanda global anual de hidrógeno desde 1975 hasta 2018.

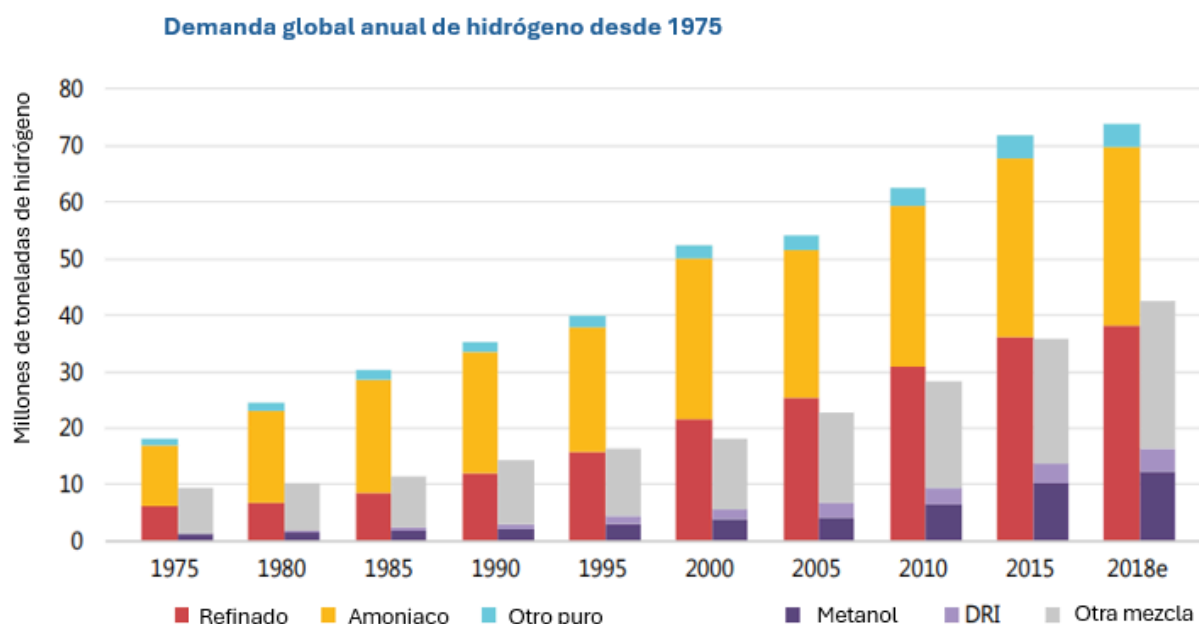


Figura 4. Demanda anual mundial de hidrógeno desde 1975. Adaptado de (IEA, 2019).

Nota: DRI = producción reducida directa de acero hierro. Refinación, amoniaco y “otros puros” representan demanda para aplicaciones específicas que requieren hidrógeno y solo se toleran pequeños niveles de aditivos o contaminantes. Metanol, DRI y “otros mixtos” representan demanda de aplicaciones que utilizan hidrógeno como parte de una mezcla de gases, como el gas de síntesis, como combustible o materia prima.

3.1.2. Refinación de hidrocarburos

La refinación del petróleo crudo incluye una serie de procesos destinados a separar sus fracciones, que pueden resultar en productos como nafta, gas licuado de petróleo (GLP), diesel, gasolina, queroseno y fuel-oil. Según las demandas del mercado, que están relacionadas con estándares de calidad y otros requisitos, se aplican tratamientos para remover contaminantes como nitrógeno, azufre, mercurio y compuestos aromáticos. Además, se llevan a cabo procesos para fragmentar las cadenas largas de hidrocarburos en cadenas más cortas (Puga, Liberona & Toledo, 2024).

El hidroprocesamiento realizado en la refinación del petróleo crudo, requiere dos procesos importantes, el hidrotratamiento y el hidrocrackeo. Ambos procesos requieren hidrógeno para su ejecución. El hidrotratamiento emplea hidrógeno con el fin de remover las impurezas del petróleo crudo, lo que contribuye a mejorar su pureza y calidad. En contraste, el hidrocrackeo se enfoca en descomponer los hidrocarburos pesados en moléculas ligeras con mayor calidad, pero para aumentar la eficiencia de este proceso también se requiere el uso de hidrógeno (Abdin et al., 2020).

3.1.3. Medios de transporte

En la última década se planteó una competencia por la tecnología de reemplazo para los motores de combustión interna. El hidrógeno se ha visto por muchos como una alternativa para los sectores donde se requiera elevada potencia de los vehículos como es el caso del transporte de carga, los trenes y la aviación (IEA, 2023b). Sin embargo, en los últimos años se ha encontrado que incluso en estos sectores la opción del uso directo de la electricidad resulta más eficiente y económica. Una alternativa para la baja densidad de energía volumétrica es la conversión del hidrógeno en amoníaco. Esta opción es atractiva para el uso como combustible marítimo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que hay una pérdida de eficiencia al realizar esta conversión (Liebreich, 2021). Estas consideraciones son importantes a la hora de evaluar la pertinencia y los requerimientos de las tecnologías de producción de hidrógeno verde para nuestro país.

3.2. Métodos de producción del hidrógeno

En la actualidad, se tienen conocimientos acerca de diversas formas de producir hidrógeno, que se distinguen principalmente por las materias primas utilizadas, por sus procesos de producción, las fuentes de energía, y el nivel de madurez tecnológica. El hidrógeno ha sido generado a través de métodos termoquímicos, electroquímicos, biológicos y fotoquímicos.

3.2.1. Métodos termoquímicos

La producción de hidrógeno por métodos termoquímicos involucra reacciones químicas mediadas por elevadas temperaturas y el uso de catalizadores heterogéneos, las cuales generan la liberación de H_2 y/o gases que contienen gran abundancia de H_2 . Estos métodos permiten la utilización de diferentes fuentes, como hidrocarburos, biomasa y agua para generar hidrógeno, cuyas rutas termoquímicas varían según el tipo de fuente utilizada (Lamb, et al., 2020). Asimismo, los métodos termoquímicos, tales como la pirólisis, gasificación y descomposición, se destacan por su capacidad para adaptarse a escalas industriales, lo cual permite la transformación de gases de síntesis y biocombustibles obtenidos como productos intermedios en combustibles y productos químicos valiosos (Arregi, et al., 2018).

Reformado de Hidrocarburos. El reformado de hidrocarburos es un proceso químico central en la producción industrial de hidrógeno. Consiste en utilizar hidrocarburos provenientes de combustibles fósiles, para obtener una mezcla de gases, principalmente de hidrógeno y monóxido de carbono. Para ello se realizan reacciones con vapor de agua, dióxido de carbono u oxígeno, a altas temperaturas, en presencia de catalizadores como el platino u otros metales nobles. Uno de los

principales problemas asociados con este método es la contaminación de los catalizadores debido al azufre presente en la mayoría de los hidrocarburos (Martínez, Martínez & Téllez, 2022).

Existen varios procesos de reformado de hidrocarburos, siendo los más destacados el reformado de metano con vapor (RMV), la oxidación parcial (OP), el reformado autotérmico (RA) que utiliza el calor producido en la OP para llevar a cabo la reacción del RMV, y el reformado seco. En la tabla 2 se presentan las reacciones de reformado de hidrocarburos.

El RMV, es un proceso endotérmico, que se destaca como el método más utilizado para la producción de hidrógeno, debido a que no requiere oxígeno puro y opera a temperaturas más bajas. Este tipo de reformado utiliza metano, agua y metales como catalizadores, especialmente platino y níquel, siendo este último el preferido por su menor costo y la falta de limitaciones en la reacción. Asimismo, para evitar la formación de coque, el RMV se realiza a temperaturas que oscilan entre 700 y 1000 °C combinado con presiones de hasta 3.5 MPa. Después del proceso de reformado, se utiliza el CO producido para formar hidrógeno adicional, mediante una reacción de desplazamiento con agua (water-gas-shift reaction, WGS por su sigla en inglés) (Yang et al., 2022). Este método tiene alta madurez tecnológica y es el más ampliamente utilizado en la industria en la actualidad. Sin embargo, demanda un elevado consumo energético, requiere una fuente de calor externa debido a la naturaleza endotérmica de la reacción. Asimismo, genera CO₂ como subproducto, lo que contribuye al cambio climático (Das & Peu, 2022).

Por otra parte, la oxidación parcial es un proceso exotérmico, disponible comercialmente, pero con una eficiencia menor en comparación con el RMV. Este método favorece la formación de coque y tiene mayores costos de producción debido a la necesidad de hacer reaccionar oxígeno puro con metano. A pesar de estas desventajas, la OP se considera el método más adecuado para producir hidrógeno a partir de materias primas como el carbón y residuos de petróleo pesado (Martínez, Martínez & Téllez, 2022). Debido a que este método genera su propio calor, reduce la necesidad de una fuente externa de energía. Asimismo, si se optimiza adecuadamente puede producir menos CO₂ que el RMV. Sin embargo, su eficiencia es menor, produce menos hidrógeno y más monóxido de carbono, además, requiere un control preciso de la temperatura para evitar desactivar el catalizador (Das & Peu, 2022).

El método RA, por su parte, combina reacciones endotérmicas y exotérmicas, lo que reduce la necesidad de energía externa. Puede manejar una variedad de hidrocarburos y oxígeno. No obstante, este proceso es más complejo, requiere un mayor control para equilibrar las reacciones y las posibles formaciones de coque (Boscherini et al., 2023).

Otra opción es el reformado seco, en el que se sustituye parcial o completamente el vapor de agua por CO₂. Esto implica la utilización de metano y CO₂ (ambos gases principales responsables del efecto invernadero) en una única reacción (Castiblanco & Cárdenas, 2020). Al utilizar CO₂ como reactante, ayuda a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, y a su vez produce una mezcla de hidrógeno y

monóxido de carbono que se puede usar para la síntesis química. Sin embargo, este método requiere una gran cantidad de energía externa para mantener la temperatura de reacción, lo que puede llevar a una alta formación de coque y, en consecuencia, la desactivación del catalizador (Boscherini et al., 2023).

Tabla 2.

Reacciones de reformado de hidrocarburos.

Reformado de hidrocarburos	
Método	Reacción/Ecuación Química
Reformado de metano con vapor (RMV)	$CH_4 + H_2O + calor \rightarrow 3H_2 + CO$ $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 + calor$
Oxidación Parcial (OP)	$CH_4 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow 2H_2 + CO + calor$
Reformado Seco	$CH_4 + CO_2 \rightarrow 2H_2 + 2CO$

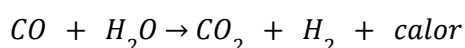
Adaptado de Castiblanco & Cárdenas (2020).

El diseño de reactores es importante para maximizar la eficiencia y la rentabilidad de este proceso. Los reactores más comunes son, de lecho fijo, de lecho fluidizado, de tubular y de microcanales. En los reactores de lecho fijo, el catalizador está dispuesto en un lecho fijo, y el gas de alimentación fluye a través del lecho catalítico. En la distribución del flujo y la transferencia de calor se suelen incorporar múltiples etapas de lecho para evitar la formación de zonas calientes que puedan desactivar el catalizador por formación de coque. En los reactores de lecho fluidizado, el catalizador se mantiene en un estado fluidizado por gases ascendentes, lo cual permite una mejor mezcla y una transferencia de calor más uniforme. Para ello, es necesario controlar la velocidad del flujo para mantener el estado fluidizado del catalizador y evitar la aglomeración. Los reactores tubulares de vapor constan de tubos donde el gas de alimentación se mezcla con vapor de agua y pasa a través de un lecho catalítico. Estos reactores son eficaces para manejar grandes flujos y altas temperaturas. (Azizan et al., 2020).

Generalmente, para el RMV se utilizan reactores de lecho fijo o reactores tubulares. Estos reactores deben manejar altas temperaturas (700-1,000°C) y requieren una fuente de calor externa significativa. Los reactores de lecho fijo son comunes debido a su simplicidad y efectividad en la transferencia de calor. Para el método de OP, usualmente se emplean tanto reactores de lecho fijo como fluidizado. Dado que la

reacción es exotérmica, el diseño del reactor debe enfocarse en la gestión del calor liberado para evitar el sobrecalentamiento, que podría dañar el catalizador. Los reactores de lecho fluidizado pueden ser preferidos por su capacidad para manejar grandes volúmenes de calor y su mezcla homogénea (Das & Peu, 2022). En el RA es común utilizar reactores de lecho fijo, aunque también se utilizan reactores de lecho fluidizado y de microcanales. El diseño debe equilibrar la gestión del calor entre las reacciones endotérmica (reformado con vapor) y exotérmica (oxidación parcial) para mantener el equilibrio térmico. Al igual que el RMV, se emplean reactores de lecho fijo y fluidizado. Sin embargo, debido a la alta sensibilidad a la formación de coque, el diseño del reactor debe considerar materiales y catalizadores que minimicen este problema (Azizan et al., 2020).

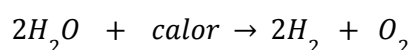
Gasificación y pirólisis de carbón y biomasa. El carbón es una materia prima que resulta importante para la producción de hidrógeno, debido a las reservas mundiales y las tecnologías y técnicas actuales. Es así, como resulta una opción económica y práctica para la producir hidrógeno a gran escala. En este sentido, el método principal de gasificación consiste en someter al carbón a un pretratamiento para eliminar la humedad presente para poderlo pulverizar. Posteriormente el carbón se introduce en el reactor con oxígeno del aire y vapor de agua a alta temperatura y presión (oxidación parcial) con el fin de producir el gas de síntesis necesario para obtener hidrógeno. Este gas resultante se separa de los sólidos formados y se limpia para eliminar partículas en suspensión y compuestos de azufre. Luego, se introduce en un reactor donde tiene lugar la reacción Water Gas Shift, lo que da como resultado una mezcla gaseosa de dióxido de carbono e hidrógeno. Finalmente se purifica y separa con el principal objetivo de obtener un flujo de hidrógeno puro (Ji & Wang, 2021).



El proceso de pirólisis de biomasa se realiza en un rango de temperatura de 400 °C a 800 °C y bajo presiones de 1 a 5 bares. Este proceso termoquímico se desarrolla sin la presencia de oxígeno, aunque en algunos casos se puede emplear oxidación parcial para generar el calor necesario. Durante el proceso, la biomasa se descompone y produce compuestos gaseosos, aceites líquidos y carbón sólido. De manera similar a la gasificación, la mezcla gaseosa resultante se dirige a un reformador con vapor, donde reacciona con el metano y otros hidrocarburos, aumentando la producción de hidrógeno. Luego, se utiliza la técnica de adsorción por cambio de presión (PSA, por sus siglas en inglés) para purificar el hidrógeno y eliminar dióxido de carbono, monóxido de carbono y otros gases presentes en la mezcla, mediante la adsorción selectiva a diferentes presiones. En esta técnica se introduce una mezcla de gases en una columna que contiene un material adsorbente. Cuando se aumenta la presión, el adsorbente atrapa las impurezas y permite que pase el hidrógeno a través de la columna. Cuando se disminuye la presión, los gases atrapados se liberan del material adsorbente, lo que permite que

éste se regenere y se utilice nuevamente en otro ciclo. Es relevante mencionar que la cantidad de hidrógeno generada depende del tipo de biomasa, el catalizador empleado, la temperatura y la duración de la reacción (Nikolaidis & Poullikkas, 2017).

Termólisis del agua. La termólisis del agua, es una disociación o ruptura de la molécula del agua mediante los efectos de la temperatura. Para lograr dicha disociación, es necesario proporcionar una gran cantidad de calor a la reacción, donde se alcancen temperaturas superiores a 2500 °C (Ju, Badwal & Giddey, 2018).



En la práctica, utilizar una vía térmica para romper directamente los enlaces covalentes de la molécula de agua no es viable, debido a que es necesario alcanzar temperaturas muy elevadas (superiores a 2500 °C). Debido a esto, se realizan investigaciones en ciclos termodinámicos que utilizan una serie de reacciones químicas acopladas que aprovechan el calor, y enfoques híbridos que combinan el proceso térmico con el eléctrico, para realizar la disociación del agua a más bajas temperaturas. Una opción es la utilización de ciclos termoquímicos que se basan en combinar una serie de reacciones químicas que operan dentro de un ciclo cerrado, en las que el agua se fragmenta y produce hidrógeno mientras los demás reactivos se recuperan y se reciclan. Para obtener la energía calorífica necesaria, comúnmente se utiliza energía nuclear o energía solar térmica de alta temperatura, con base en el nivel de temperatura que requiera el ciclo. El uso de ciclos termoquímicos solares puede operar a temperaturas de 900 a 2000 °C, utilizando concentradores solares para alcanzar esas condiciones térmicas. Estos ciclos involucran reacciones químicas escalonadas, que reducen los procesos de transferencia de calor y mejoran la eficiencia energética del sistema (Abanades, 2019).

Un enfoque híbrido incluye el uso de celdas de electrólisis de óxido sólido (SOEC), que pueden operar en un rango de temperatura intermedio (400 a 600 °C) o alto (700 a 900 °C). Estas tecnologías son más eficientes debido a la mejora en la cinética de las reacciones de evolución de oxígeno e hidrógeno. Además, la investigación en materiales y catalizadores han permitido optimizar los procesos electroquímicos a temperaturas más bajas, lo que incrementa la viabilidad de estos métodos para la producción de hidrógeno (Li et al., 2022).

3.2.2. Métodos electroquímicos

Un método prometedor para producir hidrógeno es la electrólisis del agua, debido a la alta pureza de los productos obtenidos (H_2 y O_2) y la disponibilidad de electricidad proveniente de fuentes renovables. Este proceso implica el uso de celdas electroquímicas conformadas por dos electrodos: ánodo y cátodo. Al aplicar corriente eléctrica a través de estos electrodos se genera la descomposición electroquímica del agua, lo cual da como resultado la producción de hidrógeno y oxígeno en forma gaseosa. Un factor importante en la separación efectiva de estos gases, es que el agua presente contenga compuestos disueltos que faciliten la conducción eléctrica. Estos compuestos actúan como electrolitos y pueden incluir bases, sales solubles o ácidos y membranas poliméricas que actúan como electrolitos sólidos (Chi & Yu, 2018).

Según Jin et al. (2020), aunque el potencial teórico para la reacción de electrólisis es de 1.23 V, en la realidad debido a factores entrópicos, el sobrepotencial, especialmente en la OER, lleva a voltajes de celda superiores a 1.48 V. En la figura 5 se presenta el mecanismo de electrólisis del agua, para medios básicos y ácidos.

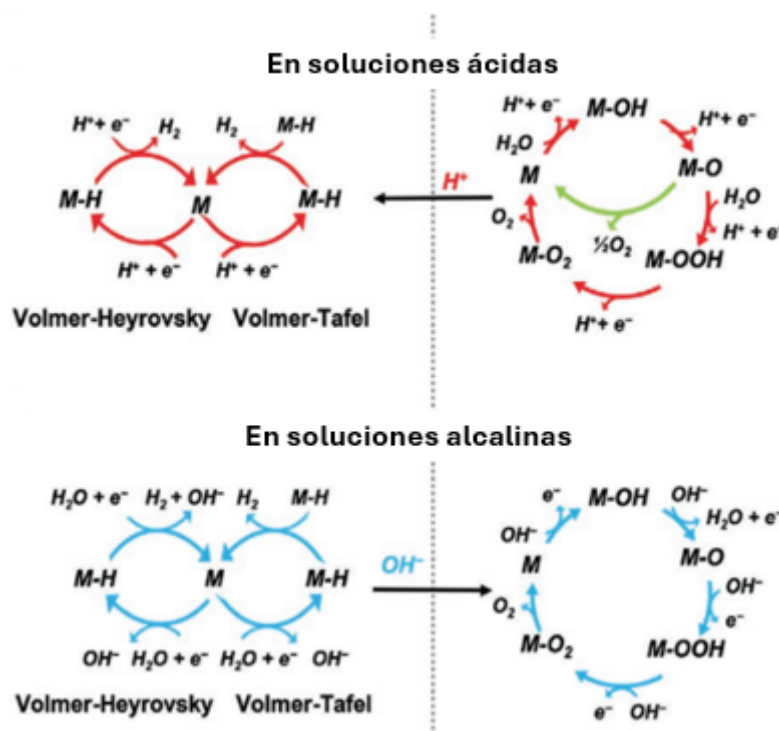
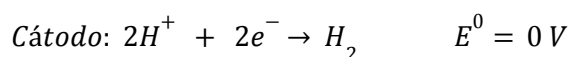
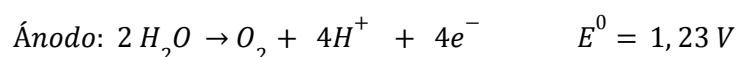


Figura 5. Mecanismo de electrólisis del agua, para medios básicos y ácidos. Adaptado de (Jin et al., 2020)

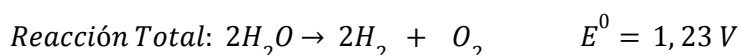
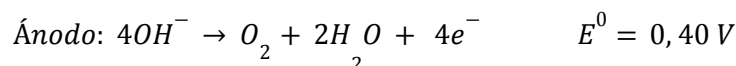
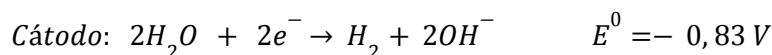
Las reacciones en soluciones ácidas y soluciones básicas que se desarrollan el cátodo y ánodo de los electrolizadores son las siguientes:

En soluciones ácidas:





En soluciones alcalinas:



En el proceso de electrólisis, se utiliza una fuente de alimentación conectada a electrodos donde se produce la ruptura de la molécula de agua en hidrógeno y oxígeno en estado gaseoso. El uso de electricidad en la producción de hidrógeno tiene la ventaja de permitir el aprovechamiento de cualquier fuente de energía primaria. Sin embargo, el mayor desafío de este proceso es que, debido a la gran estabilidad de la molécula de agua, se requiere una considerable cantidad de energía para descomponerla (286,45 kJ/mol a 25 °C). Una estrategia para reducir este problema consiste en aumentar la temperatura de operación. Cuando la temperatura es baja y el agua se encuentra en estado líquido, la mayor parte de la energía debe aportarse en forma de electricidad, pero a medida que se eleva la temperatura, es posible sustituir parte de la electricidad por calor. Por tanto, resulta viable realizar la electrólisis a alta temperatura cuando se disponga de una fuente de calor residual procedente de otro proceso. Por lo general se pretende reducir el aporte eléctrico para la electrólisis debido a que el costo de la producción de hidrógeno está ligado al costo de la electricidad utilizada, con independencia del tamaño del electrolizador (Brauns & Turek, 2020).

3.2.3. Métodos biológicos o bioquímicos

Los métodos biológicos destacan por la participación de microorganismos como catalizadores en la producción de hidrógeno, a partir de biomasa. En términos generales, estas rutas se diseñan para adaptarse a metodologías de producción específicas, especialmente en sistemas descentralizados de reducido tamaño, que se sitúan en proximidad a fuentes de materia orgánica o residuos biológicos. Estos procesos pueden realizarse mediante bacterias anaeróbicas, algas o una mezcla de las dos, y las propiedades específicas varían según los organismos microscópicos y sustratos empleados (Lamb, et al., 2020). Por consiguiente, las condiciones de reacción, como el pH y la temperatura, son impactadas directamente por la tipología de los microorganismos que participan en el proceso (Saxena, Adhikari & Goyal, 2009).

Los cuatro procedimientos más destacados para producir hidrógeno a través de procesos biológicos se consideran la biofotólisis directa e indirecta, la fotofermentación y la fermentación oscura. La biofotólisis directa es un proceso bioquímico que se asemeja al método de fotosíntesis en vegetales y algas, empleando microalgas o cianobacterias para producir biohidrógeno a partir del agua. Un ejemplo de alga verde microscópica que realiza este proceso en ausencia de oxígeno es la *CHLAMYDOMONAS REINHARDTII*. En cuanto a la fotólisis indirecta, implica la producción de hidrógeno desde el almidón y glucógeno en dos etapas: la síntesis de carbohidratos bajo la luz y la obtención de hidrógeno mediante fermentación utilizando microalgas y cianobacterias. La fermentación oscura se realiza mediante reacciones bioquímicas utilizando bacterias anaeróbicas, ciertas algas como la *GELIDIUM AMANSII* y sustratos ricos en carbohidratos cultivados sin requerir luz. En contraste, la fotofermentación ocurre mediante la descomposición de sustratos a través de una fermentación anóxica, facilitada por microorganismos que realizan la fotosíntesis como la *RHODOBACTER SPHAEROIDES* o la *CHLOROFLEXUS AURANTIACUS*, y enzimas como las nitrogenasas y las hidrogenasas (Sivaramakrishnan, et al., 2021).

3.2.4. Métodos fotoquímicos y fotocatalíticos

Los métodos fotoquímicos destinados a la producción de hidrógeno se pueden dividir en cuatro tipos de procesos según las condiciones bajo las cuales se realice: conversión térmica, conversión eléctrica, conversión indirecta y conversión de fotones. En el caso de la conversión térmica, se concentra la radiación solar para generar calor a altas temperaturas, que luego puede ser usado en procesos térmicos o ciclos termoquímicos para producir hidrógeno. En la conversión eléctrica, la electrólisis del agua puede ser impulsada por la electricidad generada usualmente a través de celdas fotovoltaicas. Este proceso ocurre sin depender directamente de la luz en la reacción. En la conversión indirecta, la captura de energía solar primero se convierte en energía térmica que se almacena, y posteriormente se transforma en energía mecánica y eléctrica, la cual se puede aprovechar en procesos electroquímicos, como la electrólisis. En la conversión de fotones, dichas partículas son captadas por fotocatalizadores y actúan como fuerza motriz para inducir reacciones químicas, como la disociación del agua para la producción de hidrógeno (Brijaldo, Castillo & Pérez, 2021; Ahmad, et al., 2015; Hitman & Jalil, 2020).

4. Electrolizadores para la producción electroquímica de hidrógeno

4.1. Electrólisis

Según Soto (2020) la electrólisis del agua consiste en la circulación de una corriente eléctrica continua a través de la molécula del agua para separar sus componentes: hidrógeno y oxígeno. Este proceso se realiza en electrolizadores, los cuales están conformados por dos terminales metálicos llamados electrodos: ánodo y cátodo, sumergidos en una solución que funciona como electrolito. El ánodo se conecta al terminal positivo de la fuente de energía eléctrica y el cátodo se conecta al terminal negativo de la misma. Cuando se aplica una tensión eléctrica en estos electrodos se produce una reacción electroquímica en la superficie en ellos. En el cátodo se produce hidrógeno y en el ánodo se produce oxígeno. En la figura 6 se presenta un esquema general de un electrolizador.

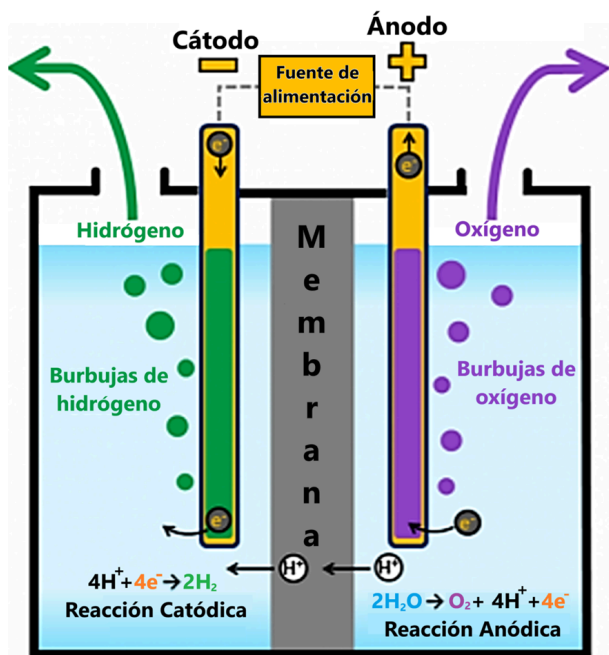


Figura 6. Esquema general de un electrolizador. Tomado de (Jiménez, 2020)

4.2. Tipos de electrolizadores

4.2.1. Electrolizador alcalino convencional (AEL)

Los electrolizadores alcalinos convencionales son los más conocidos en la industria y los más empleados por su bajo costo y mantenimiento sencillo. Son dispositivos que emplean una solución alcalina como electrolito, para la descomposición del agua (Rondán, 2016).

Este tipo de electrolizadores puede utilizar soluciones de KOH al 30 %m/m o una solución de NaOH al 25 %m/m como electrolito. La densidad de corriente es relativamente baja, de 2000 A/m² a ~4000 A/m², y la presión de trabajo alrededor de 3,2 MPa. Estructuralmente, puede usar membranas permeables, como asbesto, sulfuro de polifenileno, y electrodos porosos a base de níquel. La eficiencia del electrolizador alcalino varía entre un 60 y 70%.

Actualmente, presenta los costos de fabricación más bajos, alrededor de 1000 a 1500 Eur/Kw, lo cual los posiciona como una de las tecnologías más utilizadas actualmente. Sin embargo, sus principales desventajas radican en que requiere un electrolito líquido de carácter corrosivo, lo cual deteriora la membrana y otros componentes del equipo, no permite diseños compactos, debe garantizar un funcionamiento a altas presiones, y su arranque es lento, lo cual dificulta la adaptación con fuentes de energía variable como la eólica y solar. Otra limitación es una menor pureza de hidrógeno en comparación con los electrolizadores PEM. La producción de oxígeno se puede mezclar con el hidrógeno debido a la difusión a través del diafragma que separa los compartimentos del electrolizador. Del mismo modo, pequeñas cantidades de agua pueden estar presentes en el gas de salida en forma de vapor debido a que el electrolizador trabaja en medio acuoso. Sin embargo, esto se puede superar al realizar un aumento en la temperatura de la celda y una reducción en el flujo de electrolitos (Yujing, et al. 2019).

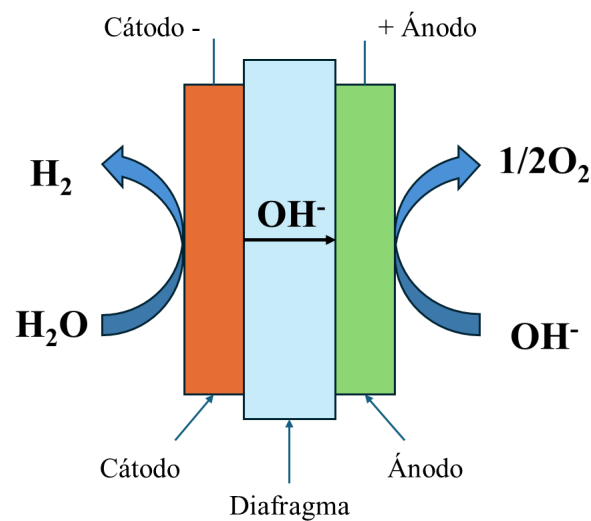
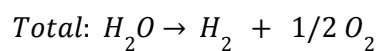
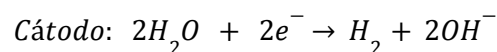
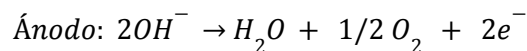


Figura 7. Representación de un electrolizador alcalino. Adaptado de (Kumar & Himabindu, 2019).

En la figura 7 se observa la representación del electrolizador alcalino. En el ánodo de este equipo, los iones hidroxilo se oxidan a oxígeno y agua mientras ceden electrones al medio. Estos electrones reducen las moléculas de agua a hidrógeno gaseoso y a iones hidroxilo con carga negativa (Rodríguez, 2022). A continuación, se presentan las respectivas ecuaciones químicas desarrolladas en el ánodo y el cátodo:



Según Zappia et al. (2022) los cátodos de Pt/C permiten la implementación de AEL con una operación eficiente a altas densidades de corriente, lo que resulta en bajos costos operativos y beneficios potenciales en el CAPEX en comparación con los AEL convencionales. Los autores presentan electrolizadores alcalinos (AEL) de alta densidad de corriente, los cuales emplean platino sobre cátodos Vulcan (Pt/C) y ánodos de acero inoxidable. Mediante la optimización del contenido de aglutinante (ionómero Nafion) y la carga de masa de platino en el revestimiento del catalizador en el cátodo, el AEL puede operar bajo las siguientes condiciones (densidad de corriente, voltaje, eficiencia energética -basada en el poder calorífico del hidrógeno-): (10000 A/m², 1,68 V, 87,8%), (20000 A/m², 1,85 V, 79,9%), (70000 A/m², 2,38 V, 62,3%). Los AEL diseñados pueden alcanzar un rendimiento similar al de un electrolizador de membrana de intercambio de protones, sin depender de catalizadores anódicos escasos como el iridio. El análisis tecnoeconómico muestra que la operación de alta densidad de corriente habilitada por los cátodos de Pt/C de AEL de celda única puede reducir significativamente el impacto de los gastos de capital (CAPEX) en el costo total del hidrógeno verde. La relación de costos entre CAPEX y gastos operativos (OPEX) es inferior al 10% para densidades de corriente de celda única ≥ 8000 A/m².

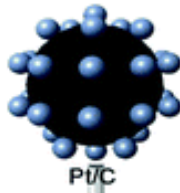


Figura 8. Representación de partículas de Pt soportadas en C. Tomado de (Zappia et al.,2022).

Groot, Kraakman, & Barros (2022) examinaron cómo la temperatura, la presión y el grosor del diafragma influyen en el desempeño de los electrolizadores alcalinos (capacidad de 20 Nm³/h). Mientras que los modelos tradicionales de estos electrolizadores, que emplean catalizadores de metales no nobles, operan a densidades de corriente bajas (2000–4000 A/m²), un análisis de corriente-voltaje sugiere que es factible operar electrolizadores alcalinos con densidades de corriente superiores a 10000 A/m² (aproximadamente a 18000 A/m²) mediante un diseño que reduzca el grosor del diafragma (0,1 mm) y aumente la temperatura (por encima de 100 °C). No obstante, estos parámetros operativos pueden incrementar el cruce de gas y generar niveles elevados de Hidrógeno orgánico total (HTO) con una carga baja, lo cual sería problemático para los sistemas de electrólisis intermitente que dependen de la energía eólica y solar. De este modo sugieren que los niveles de HTO pueden mantenerse dentro de límites aceptables con una carga mínima del 10 % al mantener la presión de funcionamiento por debajo de 8 bares, incluso con sistemas de electrolitos mixtos, lo que es más atractivo para futuras instalaciones de electrólisis a gran escala.

Con el propósito de producir hidrógeno de alta pureza utilizando agua de mar, Liang, Han & Park. (2023) emplearon un electrodo compuesto por Pt-Ru-TiO_x como ánodo y MnO_x como cátodo. Para ello, durante un período de 500 horas y una densidad de corriente de 8000

A/m² en agua salina, se empleó un catalizador ternario Pt, Ru y Ti en proporciones, Pt 6%, Ru 24% y Ti 70% O_x, logrando una eficiencia faradaica (FE) cercana al 100% en la reacción de oxidación de cloruro (ClOR). Además, en los electrodos de MnO_x, se suprime la reacción de reducción de cloro, permitiendo así que se lleve a cabo la reacción de desprendimiento de hidrógeno con una FE aproximada del 100% incluso en presencia de especies de cloro (HClO/ClO). Asimismo, se demostró que en una celda de un solo compartimento que contiene agua de mar y la combinación de ánodo Pt-Ru-TiO_x y cátodo MnO_x se impulsa tanto la oxidación de cloruro como el desprendimiento de hidrógeno con una FE cercana al 100% a una densidad de corriente de 800 A/m² durante un período de 100 horas. Se observó que la electrólisis del agua de mar inhibe completamente el proceso de producción de oxígeno y la reducción del cloro. Además, añaden que las pilas alcalinas tienen densidades de corriente más bajas en comparación con los PEM y los SOEC.

Solovey et al. (2022) desarrollaron un electrolizador alcalino sin membrana diseñado para operar a altas presiones. Identificaron que las únicas limitaciones para la presión de los gases generados en el dispositivo eran la resistencia inherente al diseño del electrolizador y la solubilidad de los gases en el electrolito, situadas en un rango de 60-70 MPa. Además, al compararlo con los electrolizadores actualmente utilizados, los resultados revelaron un aumento en la eficiencia del proceso de electrólisis de alrededor del 15%. Por último, confirmaron la posibilidad de mejorar las capacidades del electrolizador sin necesidad de incorporar componentes costosos del grupo del platino en sus diseños.

4.2.2. Electrolizador de membrana polimérica o de intercambio de protones (PEM)

A diferencia de los electrolizadores alcalinos, los electrolizadores PEM son dispositivos que pueden emplear diversas fuentes de energía renovables, como la energía eólica o solar. Sin embargo, presentan una menor comercialización, debido a su mayor costo. En la figura 9 se representa un electrolizador PEM. En este equipo se ensambla una membrana polimérica sólida y dos electrodos: cátodo y ánodo. La membrana funciona como electrolito, y su principal propiedad es la permeabilidad únicamente de los protones (H⁺), lo cual impide el paso de gases como el oxígeno (O₂) y el hidrógeno (H₂) para que no se mezclen, y se favorezca el proceso. (Rondán, 2016).

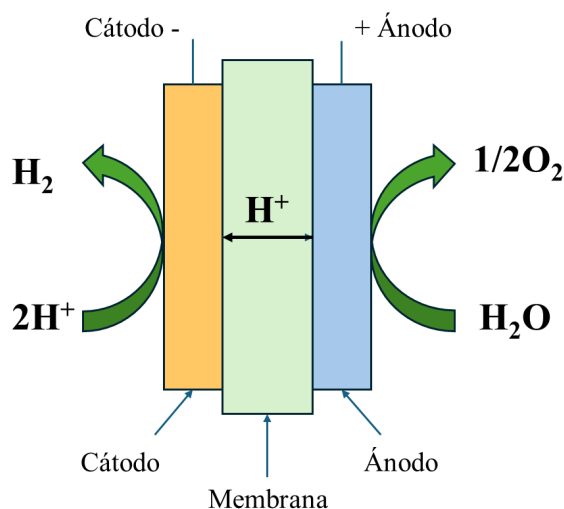
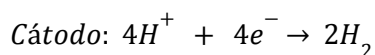
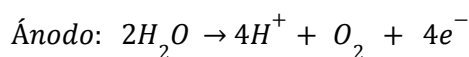


Figura 9. Representación de un electrolizador PEM. Adaptado de (Kumar & Himabindu, 2019).

Las ventajas de este tipo de electrolizador radican principalmente en que su electrolito es un polímero sólido, el cual permite un diseño compacto, temperaturas de trabajo entre los 50 y 80 °C, operaciones a presiones inferiores a 6MPa, y una mayor densidad de corriente ($10000 \text{ A/m}^2 \sim 20000 \text{ A/m}^2$). Así mismo, su arranque es rápido, presenta baja corrosión y su mantenimiento es sencillo (Yujing, et al. 2019). Sin embargo, la principal desventaja es su costo de fabricación. El entorno ácido de estos electrolizadores conlleva al uso específico de catalizadores costosos como el platino, el iridio y sus óxidos. Además, los PEM basados en Nafion y los componentes de la pila de titanio aumentan los costos (Vincent, Lee & Kim, 2021).

De manera general en cuanto al funcionamiento de los electrolizadores PEM, el ánodo toma el agua y la separa en O_2 y H^+ . Estos protones producidos se transfieren desde la membrana hasta el cátodo, donde reciben los electrones y forman el hidrógeno (Flores, 2020). Las ecuaciones químicas producidas en el ánodo y el cátodo se presentan a continuación:



Según Jin et al. (2020) la reacción de producción de oxígeno (OER) es menos favorable cinéticamente que la reacción de producción de hidrógeno (HER), debido a que la generación de oxígeno (reacción en el ánodo) implica la oxidación del agua y la ruptura de enlaces OH^- , mientras que la producción de hidrógeno ocurre mediante la reducción de H^+ en el cátodo. Para disminuir el costo total de los electrolizadores PEM y permitir la

implementación de plantas a gran escala, es esencial reducir la carga del catalizador OER garantizando una alta actividad. Además, la estabilidad de los catalizadores de óxidos de metales de transición no preciosos en un entorno ácido es baja, estos catalizadores tienden a disolverse, degradarse o perder su actividad durante la reacción.

A pesar de los numerosos estudios que han investigado procesos para mejorar la actividad y la estabilidad utilizando metales no preciosos, el rendimiento aún no alcanza los estándares requeridos para aplicaciones prácticas en electrolizadores (Wang, Cao, & Jiao, 2022). Particularmente, solo el iridio (Ir) ha mostrado una combinación adecuada de estabilidad y actividad debido a sus propiedades inherentes. Debido a que la mayoría de los metales de transición tienden a la degradación o pérdida de actividad, se han desarrollado y reportado materiales basados en iridio (Ir) como electrocatalizadores para la reacción de producción de oxígeno (OER) en entornos ácidos (Jang & Lee 2020)

Sin embargo, el iridio es un material escaso y costoso, ha representado un desafío para los investigadores reducir la cantidad de iridio empleada en la capa catalítica del ánodo, lo que a su vez permitiría reducir el costo total del sistema a un nivel viable. Se han explorado diversas estrategias, como la nanoestructuración de iridio, la formación de aleaciones de iridio con metales diferentes (óxidos), y la fijación de hierro sobre sustratos de soporte, con el fin de minimizar el uso de iridio y mejorar la actividad a gran escala, además de aumentar la estabilidad electroquímica (Ahmed et al., 2022). Según Chen, et al. (2022) la nanoestructuración del iridio y la utilización de capas delgadas de este metal con bajo contenido, reduce el uso general del catalizador con una mayor actividad. Las nanoestructuras de Ir o IrO_x mejoran la conexión entre cristales y aumentan el área de contacto entre la capa de catalizador y la capa de difusión de gas, todo ello con el propósito de mejorar el rendimiento del ánodo en PEMWE.

Aunque los catalizadores basados en Ru han demostrado una alta actividad y un precio más bajo, la sobreoxidación en electrolitos ácidos limitan su estabilidad. Un catalizador sobresaliente para aplicaciones industriales debe ser capaz de manejar densidades de corriente más elevadas al mismo tiempo que mantiene un voltaje operativo bajo. La tecnología PEM requiere operar durante largos períodos a densidades de corriente elevadas (20000 a 30000 A/m²), para lograr una mayor eficiencia en la conversión energética. Sin embargo, a elevadas densidades de corriente se suelen requerir voltajes operativos relativamente altos, lo que puede generar inestabilidad en la mayoría de los catalizadores durante el proceso de electrooxidación del agua en medios ácidos (Wang, Cao, & Jiao, 2022).

Para aumentar la actividad del Ir y reducir su cantidad de uso, Chatterjee et al. (2021) fabricaron una aleación de níquel e iridio en forma de láminas delgadas (nanoláminas), las cuales fueron separadas mediante un proceso electroquímico en un medio ácido. Durante el proceso de separación, la nanolámina porosa de iridio se separó del electrodo laminar y se depositó en el fondo de la celda electroquímica. Las nanoláminas obtenidas presentaban una porosidad aproximada de 5 nm, con un grosor nanométrico y dimensiones laterales en el rango de micrómetros. El uso de las nanoláminas de Ir resultante en PEMWE demostró un rendimiento comparable al del IrO₂ comercial, con una cantidad extremadamente baja de 0,06 mg/cm². Asimismo, en comparación con un contenido relativamente mayor (0,17 mg/cm²), la cantidad menor mostró una resistencia al transporte de masa significativamente

reducida debido a la disminución en el apilamiento de las nanoláminas y una reducción general en el espesor de la capa de catalizador.

Lv et al. (2020) desarrollaron un material nanoestructurado tipo core-shell a base de $\text{RuO}_2@\text{IrO}_x$ con el fin de mantener una elevada eficiencia en la actividad de la OER y una gran estabilidad. Las mejoras en la actividad específica, actividad en relación con su masa, sobrepotencial reducido y menor potencial de celda del nanocompuesto $\text{RuO}_2@\text{IrO}_x$ se atribuyen a una mayor área superficial específica electroquímica (ECSA) y una cinética más rápida inducida por la interacción sinérgica que se produce en la heterounión core-shell ($\text{RuO}_2@\text{IrO}_x$). Además, el $\text{RuO}_2@\text{IrO}_x$ también presenta un potencial de celda menor (1.683 V a 10000 A/m²) que el de IrO_2 (1.748 V a 10000 A/m²) y RuO_2 (1.715 V a 10000 A/m²) cuando se incorpora en un electrolizador de agua PEM de celda única. Un potencial de celda más bajo indica que se requiere menos energía para realizar la electrólisis, lo que significa una mayor eficiencia en la producción de hidrógeno. Debido a la protección efectiva proporcionada por la capa de IrO_x , el ánodo $\text{RuO}_2@\text{IrO}_x$ demuestra una sólida estabilidad durante una prueba de estabilidad de 300 horas a 10000 A/m².



Figura 10. Material nanoestructurado tipo Core-Shell $\text{RuO}_2@\text{IrO}_x$. Adaptado de (Lv et al., 2020)

Zheng et al. (2022) en su estudio presentaron un catalizador tipo core-shell $\text{IrRu}_x@\text{Ir}$, mediante la inducción de separación de fases por CO. Al aprovechar las diferentes tasas de adsorción de CO en la superficie de Ir y Ru, la reducción química de ambos metales produjo distintas fases y dio lugar al catalizador núcleo-capa $\text{IrRu}_x@\text{Ir}$. La fuerte interacción entre el núcleo y la capa corroborada por análisis XPS, promovió un aumento en el estado de oxidación del Ir dentro de la capa de Ir, lo cual mejora la actividad en la reacción de oxígeno.

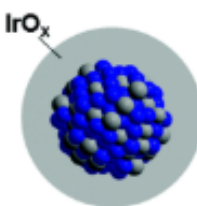


Figura 11. Catalizador tipo core-shell $\text{IrRu}_x@\text{Ir}$. Tomado de (Zheng et al., 2022)

Jiang et al. (2019) presentaron un método eficaz para optimizar la utilización del iridio y su actividad en relación con su masa, mediante la síntesis de una aleación de $\text{Ir}_{0.6}\text{Sn}_{0.4}\text{O}_2$ (IrSn), como catalizador OER. La inclusión de estaño mejora la utilización del iridio y potenciar la actividad en la reacción de producción de oxígeno (OER) debido a la

modificación de la estructura electrónica de IrO_2 . En comparación con el catalizador de referencia utilizado (IrB de 200-500 nm), IrSn mostró un tamaño de partícula reducido y mayor porosidad, lo que resultó en una mayor cantidad de sitios activos electroquímicos. La aleación de IrO_2 con SnO_2 , al tener parámetros reticulares similares, aumenta la dispersión de las nanopartículas y promueve la eliminación eficiente de grupos hidroxilo para liberar más sitios activos en IrO_2 . En cuanto a la relación entre el estaño y el iridio, se observó que una mayor cantidad de iridio (en proporción 6:4 y 8:2 para Ir:Sn) destacaba el efecto positivo del estaño en el compuesto aleado. Como resultado, el ánodo IrSn demostró un voltaje de celda más elevado de 1,89 V a 20000 A/m^2 , en comparación con los 1,948 V del electrodo IrB . También se encontró que una carga de $0,5 \text{ mg/cm}^2$ del catalizador IrSn presentaba una actividad en relación con su masa, más alta de 6720 mA/mg Ir a 1,95 V en PEMWE.

Jiang et al. (2021) utilizaron nanobarras de óxido de tungsteno (WOx) como un soporte eficaz, junto con una delgada película de iridio (Ir). La matriz ordenada de WOx se obtuvo mediante una reacción hidrotermal de una lámina de tungsteno (W), seguida por un proceso de electrodeposición para depositar Ir en la superficie, obteniendo como producto Ir@WOx NR (nanorodillos). El WOx como sustrato de soporte lo eligieron debido a su excelente estabilidad, y se demostró que los canales alineados verticalmente podían mejorar la retención de agua para reducir la resistencia al transporte de masa durante la operación de PEMWE. La electrodeposición generó un recubrimiento delgado y defectuoso de Ir (68 nm) sobre los WOx NR, lo que permitió reducir la cantidad total de Ir y mejorar la actividad en relación con la masa de Ir . Como resultado, el rendimiento de PEMWE del MEA ensamblado Ir@WOx NR alcanzó 22000 A/m^2 a 2 V y mostró una operación prolongada durante 1030 horas a 5000 A/m^2 con una baja carga de Ir ($0,14 \text{ mg Ir/cm}^2$). La tasa de caída del voltaje de la celda fue de apenas $49,7 \text{ } \mu\text{V/h}$, atribuida principalmente a la estabilidad química del WOx y su sólida interacción con las partículas de Ir .

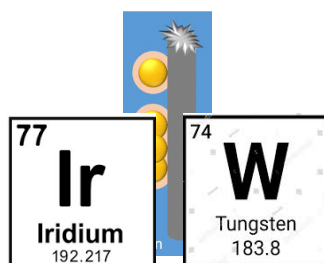


Figura 12. Representación de nanobarras de WOx con película de Ir . Adaptado de (Jiang et al., 2021)

Por otra parte, Lim et al. (2020) sugieren que una capa fina de IrO_2 colocada sobre soportes de Pt permite una elevada área superficial, de $30,9 \text{ m}^2/\text{g Ir}$, siendo 2,5 veces mayor que la obtenida sin el soporte de Pt ($12,6 \text{ m}^2/\text{g Ir}$). El IrO_2 se electrodeposita, lo cual le otorga una superficie altamente hidrofílica al electrodo OER. Asimismo, una mínima cantidad de catalizador $\text{IrO}_2\text{-ED}$ se distribuye de manera uniforme sin generar aglomerados de partículas, ni poros sub-micrométricos adicionales en capas de transporte de protones (PTL) elaboradas con titanio. La combinación $\text{Pt@IrO}_2\text{-ED}$ conduce a un mejor desempeño en el proceso de electrólisis (71000 A/m^2 a 2V) con solo $0,43 \text{ mg/cm}^2$ de carga total de Pt .

Según Liu et al. (2021a) cuando se cubre PTL fabricadas con titanio con una capa delgada de platino o iridio ($0,1 \text{ mg/cm}^2$), se registra un aumento diez veces mayor en la estabilidad general durante un período de funcionamiento de 4000 horas de la celda. Se observó que después de formar una capa delgada de IrO_x ($< 10 \text{ nm}$), la mayor parte del iridio permaneció de forma metálica, lo que aseguró la estabilidad del PTL durante su funcionamiento. Además, a diferencia del PTL sin recubrimiento, la capa de TiO_x no se oxidó debido al recubrimiento de iridio.

Liu et al. (2021b) depositaron una cantidad muy baja de iridio (entre $0,005$ y $0,05 \text{ mg/cm}^2$), sobre el PTL de titanio utilizando el método de pulverización catódica con plasma. Se encontró que una carga de iridio de $0,025 \text{ mg/cm}^2$ logra un rendimiento similar en el electrolizador PEM en comparación con una carga más alta. Esta carga de iridio no solo redujo la resistencia eléctrica del PTL, sino que también mejoró la actividad del catalizador. Asimismo, en este estudio es posible observar una reducción de hasta 40 veces en la cantidad de oro (Au) o platino (Pt) en comparación con la carga de iridio utilizada.

Finalmente, el tipo y diseño de la membrana influyen en los elevados costos de las tecnologías PEM, debido a que provienen de los materiales de capa de transporte poroso de titanio. En este sentido, Schuler et al. (2020) desarrollaron y evaluaron una serie de materiales con tres capas microporosas (MPL) distintas que presentan propiedades de interfaz mejoradas. Estas estructuras multicapa sintetizadas, elaboradas a partir de polvos de titanio económicamente viables, exhiben una menor rugosidad superficial. Estos materiales de capa de transporte poroso presentan rendimientos electroquímicos superiores en comparación con las estructuras convencionales de una sola capa, con una utilización del catalizador hasta tres veces mayor y una disminución de 60 mV en el sobrepotencial cuando se opera a una densidad de corriente de 20000 A/m^2 . Los materiales de capa de transporte poroso combinan propiedades superficiales deseables con una alta porosidad abierta y baja rugosidad de los materiales sinterizados, lo que permite el uso de membranas delgadas en conjunto con capas de transporte de titanio anódico. Las MPL demuestran que una distribución uniforme de la presión de contacto, contribuye a una mayor utilización del catalizador y una reducción en las pérdidas de transporte de masa.

4.2.3. Electrolizador de estado sólido o de óxido sólido (SOEC)

Los electrolizadores de óxido sólido (SOEC) son tecnologías poco comercializadas debido a que aún se encuentran en desarrollo. Sin embargo, prometen ser equipos muy eficientes y de bajo costo para la producción de hidrógeno debido a que utilizan cerámicas de óxido sólido como electrolito (IEA, 2019). Su funcionamiento lo realizan a temperaturas elevadas de $500 \text{ }^\circ\text{C}$ a $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, las cuales se pueden alcanzar mediante el suministro de calor residual industrial, energía eólica y solar. Los sistemas SOEC consumen poca energía y su eficiencia puede alcanzar el 100% con una densidad de corriente aproximada de 10000 A/m^2 . Sin embargo, este tipo de electrolizadores presentan problemas de seguridad e

inestabilidad, y los desafíos principales radican en reducir la degradación de los materiales debido a que funciona a altas temperaturas (Rodríguez, 2022).

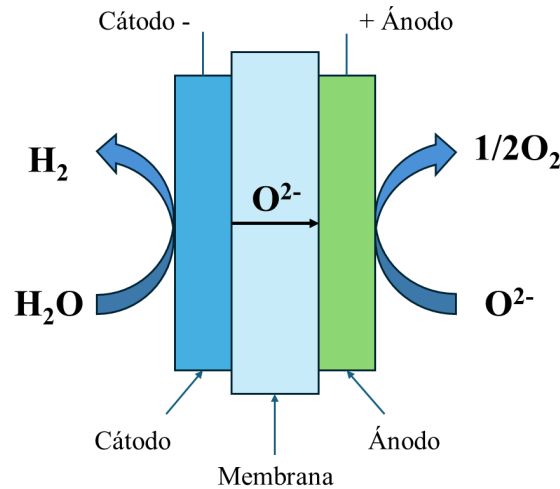
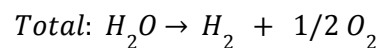
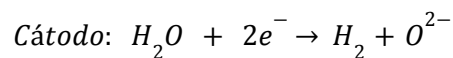
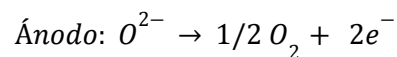


Figura 13. Representación de un electrolizador SOEC. Adaptado de (Kumar & Himabindu, 2019).

Para el funcionamiento de estos equipos, el cátodo debe ser alimentado con vapor de agua, y al aplicar un potencial eléctrico, las moléculas se difunden y se disocian en la interfaz cátodo-electrolito para formar hidrógeno gaseoso y iones de oxígeno (O^{2-}). El hidrógeno que se forma se propaga en dirección a la superficie del cátodo, donde se captura. Los iones de oxígeno se transportan por medio de la cerámica de óxido sólido hasta llegar al ánodo, proceso en el que se oxidan para producir el oxígeno gaseoso. Dicho gas, se difunde hacia la superficie del ánodo y allí es recolectado (Rodríguez, 2022). En la figura 13 se representa un electrolizador SOEC, y las ecuaciones químicas generadas en el ánodo y el cátodo se presentan a continuación:



Según Wang et al. (2019) el cermet (contracción de cerámico y metal) basado en níquel es ampliamente utilizado como cátodo a causa de su gran eficiencia catalítica y su compatibilidad tanto química como térmica con los electrolitos. No obstante, su uso en la electrólisis utilizando dióxido de carbono en el flujo de entrada se ve obstaculizado por la desactivación debido al coque y la oxidación del níquel. Para controlar lo anterior, una alternativa son los conductores mixtos de iones y electrones (MIEC) debido a que son estables en atmósferas con CO_2 . Algunos ejemplos de estos elementos son la perovskita doble $Sr_2Fe_{1.5}Mo_{0.5}O_6$, $La_xSr_{1-x}TiO_{3-\delta}$, el $LaCrO_3$ dopado, entre otros. En particular, el cátodo

más utilizado en SOEC es el compuesto de níquel y zirconia estabilizada con itria (Ni-YSZ). En esta combinación, el níquel facilita el movimiento de electrones, en tanto que la zirconia estabilizada con itria ofrece una ruta para la difusión de iones de oxígeno y funciona como un inhibidor del aumento de tamaño de las partículas de níquel durante el proceso. Este material muestra un flujo de electrones elevado y buena capacidad tanto catalítica como electroquímica.

Tong, et al. (2020) mencionan que la integración de electrocatalizadores de tamaño nanométrico dentro de una estructura de electrodo de Ni-YSZ reduce las partículas catalíticas de escala micrométrica a escala nanométrica, lo que aumenta considerablemente las longitudes del límite de fase triple (longitud en la que se encuentran todas las vías de conducción porosa, iónica y electrónica) y, por consiguiente, mejora el rendimiento del electrodo. En contraste con un electrodo convencional, aquellos con una mayor concentración de sitios activos por unidad de volumen del electrodo pueden operar con un sobrepotencial más bajo para una misma densidad de corriente de electrólisis aplicada. Además, se ha comprobado que los electrodos de Ni-YSZ infiltrados con nanopartículas mantienen su estabilidad durante períodos prolongados, incluso a altas densidades de corriente.

Por otra parte, según la revisión realizada por Baratov et al. (2024), el electrolito tiene un papel fundamental en la conducción electroquímica de iones y de este modo, debe cumplir con varios requisitos:

- Alta densificación sin porosidad continua, con el fin de separar los gases del cátodo y del ánodo para evitar su mezcla mecánica.
- Alta conductividad de iones y baja conductividad de electrones en procesos de oxidación y reducción, con el fin de prevenir posibles fugas internas de electrones.
- Alta estabilidad química para resistir las interacciones con componentes gaseosos o atmósferas oxidadas/reducidas a elevadas temperaturas.
- Alta compatibilidad química con otros materiales funcionales, asegurando que no se formen ni interactúen productos de baja conductividad en las interfaces.
- Alta compatibilidad termo- y quimio-mecánica para mantener una adecuada adhesión en las interfaces, y así, evitar grietas o delaminaciones durante los ciclos térmicos de calentamiento/enfriamiento y de redox/voltaje.
- Bajo costo de los componentes del electrolito, y elaboración de electrolitos de película delgada.

Los óxidos basados en ZrO_2 se utilizan frecuentemente como electrolitos en aplicaciones de SOFC y SOEC. Para lograr valores de conductividad adecuados, es necesario estabilizar la fase básica de circonia en una estructura cúbica, lo cual se puede lograr mediante la adición de dopantes trivalentes (Y^{3+} , Yb^{3+} , Sc^{3+}) o divalentes (Ca^{2+} , Mg^{2+}). La incorporación de estos dopantes genera mayor conductividad iónica de oxígeno en los óxidos complejos. Entre los electrolitos basados en ZrO_2 , los más conocidos son la YSZ (circonia estabilizada con itria) y

la ScSZ (circonia estabilizada con escandia) (Mathur et al., 2023). Sin embargo, según la revisión crítica de Maiti et al. (2022) los electrolitos basados en ceria u óxido de cerio (CeO_2) actualmente son investigados como alternativa para SOFC de temperatura intermedia y baja. Debido a su alta compatibilidad con los electrodos y la elevada conductividad de iones de oxígeno, la ceria tiene la capacidad para formar una variedad de soluciones sólidas $\text{Ce}_{1-x}\text{M}_x\text{O}_{2-d}$ (donde M puede ser Y, lantánidos o elementos alcalinotérreos), y cuya conductividad es mayor en más de un orden de magnitud que YSZ a temperaturas entre 500 y 900 °C.

Según la revisión de Baratov et al. (2024) los materiales de cerato de Bario (BaCeO_3) dopados presentan la conductividad protónica más alta registrada, hasta de 100 mS/cm a temperaturas de 700 a 800 °C. Esta gran conductividad se debe a una combinación de factores cristalográficos favorables, como las bajas electronegatividades de los cationes básicos, sus grandes radios iónicos y el amplio volumen de la red cristalina. Estos elementos debilitan los enlaces Metal-Oxígeno, lo cual resulta en una alta conductividad iónica de oxígeno en ambientes secos y una elevada conductividad protónica en ambientes húmedos. Sin embargo, estos materiales presentan inconvenientes debido a sus problemas de baja estabilidad química, por la descomposición de las fases de BaCeO_3 en entornos con CO_2 e incluso en presencia de H_2O a temperaturas inferiores a 500 °C. Esta descomposición genera fases (BaCO_3 , $\text{Ba}(\text{HCO}_3)_2$, $\text{Ba}(\text{OH})_2$ y CeO_2) que bloquean completamente la conductividad protónica de la fase de cerato original. Por consiguiente, para evitar la formación de estas impurezas, se pueden añadir diversos dopantes estabilizadores (In^{3+} , Ti^{4+} , Sn^{4+} , Zr^{4+} , Hf^{4+} , Th^{4+} , Ta^{5+}) al subnivel de Ce mediante su sustitución parcial. Esto mejora la estabilidad química de los ceratos multi-dopados resultantes, aunque algunas otras propiedades funcionales pueden verse afectadas.

De igual forma, los óxidos LaAlO_3 y LaGaO_3 son ampliamente investigados para el diseño de electrolitos conductores de iones de oxígeno. Ambos materiales presentan un coeficiente de expansión térmica similar al de la circonia y ceria, cuyos valores se encuentran en un intervalo de 10×10^{-6} y $13 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$. Los galatos se consideran uno de los mejores conductores de iones de oxígeno, mostrando una capacidad de 120-150 mS/cm a 800 °C, superando los materiales dopados con ZrO_2 y CeO_2 y permitiendo integrarse en el diseño de SOEC y SOEF. Sin embargo, los galatos pueden presentar varias limitaciones, como la necesidad de altas temperaturas de sinterización para lograr la densificación deseada, las impurezas que se pueden adquirir durante este proceso, la posible evaporación del galio (debido a las altas temperaturas) y la incompatibilidad química con electrodos compuestos de níquel (Baratov et al., 2024).

Anantharaman & Dasari (2021) examinan el uso de los pirocloros basados en Nb, Ti, Zr y Mn como materiales funcionales para SOFC y SOEC. Dentro de estos, los zirconatos de Nd, Gd, y Sm dopados con magnesio o calcio muestran conductividades iónicas de 3-10 mS/cm a 800 °C. Además, otros pirocloros pueden tener comportamientos mixtos de conductividad iónica y electrónica o conductividades co-iónicas. Asimismo, detallan los factores que influyen en la conductividad iónica de los óxidos tipo pirocloro, como la importancia de una estructura defectuosa con alta movilidad de oxígeno, una energía de activación baja, y que cumpla con un criterio específico de relación de radios iónicos, además de una interacción notable entre iones. Los autores señalan que la conductividad iónica en el pirocloro se incrementa al mejorar la migración de oxígeno mediante la creación

de vacantes de oxígeno. Estas vacantes pueden formarse al añadir un dopante adecuado que genere un mecanismo de compensación de carga. De manera similar, la conductividad eléctrica mejora al incorporar dopantes apropiados (como Ce, Ru, Pr, etc.), debido a la estructura desordenada y la creación de defectos anti-Frenkel, lo que da lugar a la formación de vacantes de oxígeno y, en consecuencia, mejora la conductividad.

Otro electrolito conductor de protones que ha sido ampliamente estudiado es el circonato de bario (BaZrO_3), el cual se caracteriza tanto por su gran estabilidad química en atmósferas gaseosas que contienen H_2O y CO_2 , como por su conductividad protónica muy semejante a la de los materiales basados en BaCeO_3 . Vera et al. (2021) presentan una visión general de los parámetros clave del transporte de protones en los circonatos, abarcando la termodinámica de su hidratación, los efectos de la asociación de defectos y la captura de protones en la hidratación, así como sus propiedades de conductividad protónica y electrónica. Hyodo et al. (2020) en su estudio, presentan una conducción rápida y estable de protones mediante un policristal de circonato de bario dopado con un 60% de Sc, alcanzando una conductividad total de 0,01 S/cm a 396 °C durante 200 horas. El dopaje de Sc en el circonato de bario incrementa simultáneamente la concentración de protones, la difusividad de protones en el material, la conductividad específica en los límites de grano y el crecimiento del grano. Una prueba de estabilidad acelerada bajo una corriente de CO_2 altamente concentrado y humidificado, utilizando difracción de rayos X in situ, muestra que la fase del circonato de bario se mantiene estable durante 240 horas a 400 °C bajo 0,98 atm de CO_2 . Debido a lo anterior, el uso de este material como electrolito en dispositivos electroquímicos de estado sólido que operan a temperaturas intermedias es muy prometedor. Por su parte, Rasaki et al. (2021) han analizado los logros científicos y tecnológicos de los electrolitos de BaZrO_3 , abordando sus características de síntesis y sinterización, parámetros de densificación y tamaño de grano, así como las tendencias recientes en el diseño químico y los métodos de fabricación de electrolitos. Además, los autores ofrecen información sobre el diseño de materiales de electrodo derivados de BaZrO_3 mediante la introducción de altas cantidades de iones de Co y/o Fe para crear electrodos de triple conductividad.

La revisión de Fop (2021) presenta datos experimentales sobre el transporte de protones en varios compuestos relacionados con perovskita ($\text{Ba}_7\text{Nb}_4\text{MoO}_{20}$, $\text{Ba}_5\text{Er}_2\text{Al}_2\text{ZrO}_{13}$, $\text{Ba}_4\text{M}_2\text{O}_9$, donde M puede ser Nb, Sb o Ta), fases de Ruddlesden-Popper (BaNdInO_4 , BaNdScO_4), y materiales de brownmillerita ($\text{Ba}_2\text{In}_2\text{O}_5$, $\text{Ba}_2\text{InGaO}_5$, $\text{Ba}_2\text{ScGaO}_5$). También se consideraron otros tipos de estructuras, como orto-niobatos (LaNbO_4 dopado) y orto-tantalatos (LaTaO_4 dopado), galatos (LaBaGaO_4 , $\text{RE}_3\text{Ga}_5\text{MO}_{14}$, donde RE es La o Nd y M es Si, Ti, Sn o Ta), apatitas ($\text{La}_{9,6}\text{Si}_6\text{O}_{26,4}$, $\text{La}_{9,67}\text{Ge}_6\text{O}_{26,5}$), pirocloros ($\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ y $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$ dopados) y tungstatos ($\text{La}_{27}\text{W}_5\text{O}_{55,5-d}$, $\text{La}_{5,5}\text{WO}_{11,25-d}$, $\text{La}_6\text{WO}_{12}$).

Tarasova et al. (2022) en su revisión consideran que las perovskitas estratificadas y hexagonales son clases relativamente nuevas y prometedoras de conductores protónicos. En su estudio, analizan las propiedades de transporte de las fases BaNdInO_4 , BaNdScO_4 , SrLaInO_4 y BaLaInO_4 , tanto en sus formas originales como dopadas. De lo anterior, consideran al BaLaInO_4 como el más prometedor, debido a su elevada conductividad protónica y su gran absorción de agua (1,5 mol de H_2O aprox. por unidad de fórmula).

Asimismo, Choudhary et al. (2023) realizaron un análisis de los óxidos complejos de $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$ y sus derivados, abarcando sus estructuras cristalinas, comportamiento de hidratación, mecanismo de conductividad iónica (tanto de oxígeno como de protones), comportamiento catalítico, temperatura de operación y facilidad de procesamiento. Los autores estudiaron las posibles estructuras (pirocoro o fluorita distorsionada) de $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$ y proporcionaron una visión general de $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$ como catalizador y como otro componente (electrolito, cátodo, ánodo) en SOFCs y SOECs.

De igual forma, Xiang et al. (2024) revisaron el transporte de protones en óxidos complejos con estructuras de fluorita (basadas en zirconia, ceria) y pirocoro (zirconatos, estannatos y titanatos de lantánidos), así como sus posibles aplicaciones electroquímicas. Los autores señalan que aunque la conductividad protónica de estos compuestos sigue siendo baja, su estabilidad química es excelente. Asimismo, mencionan que los óxidos de fluorita/pirocoro, pueden actuar como capas de protección para evitar el contacto de materiales de $\text{Ba}(\text{Ce},\text{Zr})\text{O}_3$ con el gas CO_2 o para reducir la corriente de fuga en los PCFCs/PCECs relacionados.

Por otra parte, las perovskitas basadas en cobalto se consideran unos de los electrodos de oxígeno más prometedores en términos de su actividad electroquímica para la reacción de reducción de oxígeno (ORR). Por lo tanto, los electrodos más avanzados para SOFCs y SOECs están basados principalmente en perovskitas de LaCoO_3 o BaCoO_3 . En el trabajo de Zhang et al. (2022) consideran las estructuras cristalinas y electrónicas para LaCoO_3 puro y dopado, y sus efectos en la actividad de la reacción de evolución de oxígeno (OER). Mencionan dos posibles diseños para buenos electrodos: (1) reemplazo parcial de cationes básicos con diferentes dopantes (para los sitios A o B de la perovskita ABO_3 o ambos sitios simultáneamente) a nivel de materiales, y (2) ingeniería de superficie e interfacial a nivel de estructuras multicapa. Kumar & Khandale (2022) realizaron una revisión detallada de los electrodos basados en cobalto con estructuras de perovskita simple y doble. Para ello, compararon dos sistemas básicos, BaCoO_3 y SrCoO_3 (SC), de los cuales centraron su atención en este último debido a la menor reactividad química con atmósferas que contienen CO_2 . Según su análisis, el SC puro tiene una alta conductividad de hasta 150 S/cm a 900 °C. Sin embargo, este alto nivel de conductividad está asociado con una baja estabilidad de la fase SC a temperaturas por debajo de 900 °C debido a una transición de fase de una estructura cúbica a una estructura hexagonal, lo que perjudica el transporte de iones de oxígeno. Para superar este inconveniente, se analizaron estrategias de dopaje. Este proceso se puede realizar en los sitios de Sr, Co o en ambos sitios simultáneamente. Se enfatizó que cada tipo de dopaje tiene sus propias funciones. Por ejemplo, la sustitución parcial del cobalto con escandio, hierro, níquel, cobre disminuye efectivamente los coeficientes de expansión térmica debido a la reducción de Co^{4+} a Co^{3+} , el dopaje parcial del cobalto con dopantes de alta valencia (como Nb^{5+} , Ta^{5+} , Sb^{5+} , Mo^{6+}) estabiliza la estructura cúbica del SC, proporciona alta conductividad iónica y electrónica mixta, y mejora la estabilidad química hacia la formación de carbonatos.

Según Jiang, Wei & Huang (2022). la estructura en capas de la cobaltita $\text{LnBaCo}_2\text{O}_{5+d}$ puede describirse como una secuencia de CoO_2 , LnO , CoO_2 , BaO , donde los octaedros desordenados de CoO_2 están intercalados con capas alternas de LnO y BaO , resultando en un ordenamiento en los sitios de la estructura. $\text{LnBaCo}_2\text{O}_{5+d}$ puede cristalizar en varias estructuras, como ortorrómbica, tetragonal o cúbica, dependiendo de la naturaleza del ion

Ln^{3+} y de los dopantes introducidos, así como de su concentración. La estructura específica está determinada por la estequiometría del oxígeno (d), que puede variar entre 0 y 1. Por esta razón, las composiciones de $\text{LnBaCo}_2\text{O}_{5+d}$ a menudo se representan como $\text{LnBaCo}_2\text{O}_{6-d}$. Estas perovskitas muestran una conductividad electrónica muy elevada (oscilando entre 100 y 1000 S cm^{-1}), junto con un alto transporte iónico de oxígeno y una buena compatibilidad química con electrolitos basados en CeO_2 , LSGM y $\text{Ba}(\text{Ce,Zr})\text{O}_3$. Sin embargo, debido a que presentan un elevado coeficiente de expansión térmica (superior a $20 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), se deben realizar sustituciones en los sitios de Ba y Co. Los estudios realizados por Klyndyuk et al. (2021) y Zheng & Pang (2023) confirman que las sustituciones de Ln^{3+} por lantánidos más pequeños, de Ba^{2+} por calcio o estroncio, y de iones de Co por hierro, níquel o cobre es beneficiosa para reducir los coeficientes de expansión térmica. Asimismo, la investigación de Sahini et al. (2022) examina las características de síntesis y varias propiedades funcionales de $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_{3-d}$, abarcando el comportamiento termoquímico, la estabilidad de fase, las propiedades mecánicas y el desempeño electroquímico como membranas permeables al oxígeno. A pesar de sus numerosas propiedades beneficiosas, el material presenta ciertos inconvenientes, como una expansión química significativa a temperaturas superiores a 500 °C, una posible transición de fase de su estructura cúbica a una perovskita hexagonal por debajo de 850 °C, baja estabilidad química en presencia de CO_2 y baja conductividad iónica a temperaturas inferiores a 650 °C.

Tarutina et al. (2024) examinan $\text{BaCo}_{0.4}\text{Fe}_{0.4}\text{Zr}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ (BCFZ), $\text{BaCo}_{0.4}\text{Fe}_{0.4}\text{Zr}_{0.1}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$ (BCFZY) y sus derivados dopados, que son composiciones comúnmente utilizadas para desarrollar electrodos modernos con alta actividad electroquímica en procesos ORR y OER. Estas ferritas de cobaltita muestran una notable estabilidad química y compatibilidad con electrolitos conductores de protones basados en $\text{Ba}(\text{Ce,Zr})\text{O}_3$. Además, presentan un comportamiento de expansión térmica aceptable, mejor transporte iónico de oxígeno y una buena capacidad de hidratación. Estas propiedades los hacen adecuados como materiales de triple conductividad con sitios electroquímicamente activos extendidos en la interfaz electrolito/electrodo para el intercambio iónico. Como resultado, las celdas electroquímicas cerámicas protónicas correspondientes pueden alcanzar un alto rendimiento tanto en modo de celda de combustible como de celda de electrólisis, superando a aquellas que utilizan otros electrodos de oxígeno.

Por otra parte, Posdziech, Schwarze & Brabandt (2019) en su artículo muestran la importancia de la presión en los SOEC. Al aumentar la presión en este sistema se observa una mejoría leve en el rendimiento, debido a la velocidad de las reacciones y la velocidad de difusión. Asimismo, es posible mantener un funcionamiento estable a presiones elevadas, cuando se reduce al mínimo la presión de los compartimentos de la celda en el lado del combustible y del aire. Por consiguiente, la operación a alta presión permite una mayor integración entre los electrolizadores y los reactores de síntesis química que operan bajo presión.

4.2.4. Electrolizador de membrana de intercambio aniónico (AEM)

Los electrolizadores basados en membranas de intercambio aniónico son un tipo de tecnología que combina las ventajas de los electrolizadores alcalinos y los PEM. Dentro de sus principales ventajas se encuentran el uso de catalizadores no nobles y más económicos como el Níquel y el cobalto, y componentes libres de titanio. Sin embargo, las membranas AEM presentan problemas de estabilidad mecánica y química, lo que provoca variabilidad en la vida útil. Además, debido a que se encuentran aún en etapa de investigación y desarrollo, no presentan un rendimiento competitivo principalmente por la baja conductividad de las membranas, el diseño de los electrodos y la falta de catalizadores óptimos que aumenten la velocidad de reacción. Para mejorar el rendimiento se pueden ajustar las propiedades de conductividad de la membrana o adicionar un electrolito soporte como hidróxido de potasio (KOH) o bicarbonato de sodio (NaHCO₃). Sin embargo, debido a que los iones hidroxilo (OH⁻) son más lentos para desplazarse a través de las membranas, en comparación con los protones (H⁺), requiere de la fabricación de membranas más delgadas o con mayor densidad de carga, lo cual conduce a una menor durabilidad (IRENA, 2020). La figura 14 representa un electrolizador AEM, y a continuación se presentan las ecuaciones químicas producidas en el ánodo y el cátodo.

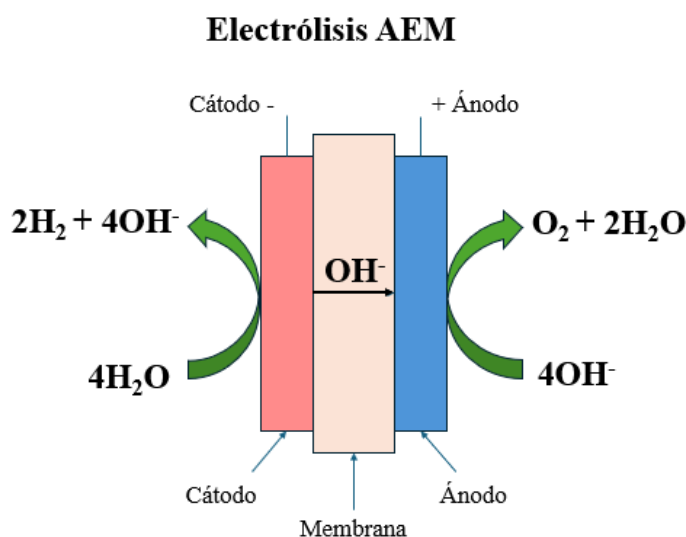
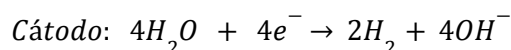
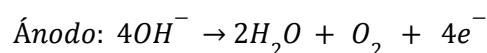


Figura 14. Representación de un electrolizador AEM. Adaptado de (IRENA, 2020)



Al combinar las ventajas de los electrolitos líquidos en los A-WE (Electrólisis del Agua Alcalina) -como el bajo costo de capital- con las ventajas de los PEM-WE (Electrólisis del Agua con Membrana de Intercambio de Protones) -como el bajo costo operativo, la producción de hidrógeno presurizado y ultrapuro, y una mayor seguridad- los AEM-WE (Electrólisis del Agua con Membrana de Intercambio de Aniones) tienen el potencial de funcionar a un costo significativamente reducido. Estos sistemas no requieren el uso de metales de tierras raras, ni metales preciosos del grupo del platino en ningún componente celular, y emplean membranas poliméricas sin flúor. Esto genera oportunidades para la producción masiva y sostenible de hidrógeno verde a gran escala. Sin embargo, la tecnología AEM-WE aún está en una etapa inicial en comparación con A-WE y PEM-WE, lo que sugiere que hay un amplio espacio para futuras investigaciones y desarrollo en este campo (Mukerjee, Yan, & Xu, 2021).

Henkensmeier et al (2021) consideran que es importante la utilización de agua pura como fuente de alimentación en los sistemas AEM, debido a que la mayoría de estos sistemas aún emplean soluciones alcalinas para su alimentación. Esto se debe a varios factores:

- En el proceso, el agua se consume en el cátodo, generando iones hidróxido que migran hacia el ánodo, donde reaccionan con el agua y el oxígeno. Esto resulta en un traslado neto de agua desde el cátodo hasta el ánodo, lo que requiere un equilibrio en las concentraciones de las soluciones de alimentación.
- Se presume que ciertos componentes del sistema mantienen mejor su estabilidad en contacto con agua que con soluciones de hidróxido de potasio (KOH).

Sin embargo, es importante tener en cuenta que el uso de agua pura afectará la conductividad de la membrana. Debido a esto se debe considerar:

- Un aumento en la concentración de KOH incrementa la diferencia de presión osmótica, reduciendo así el contenido de agua en la membrana.
- Los AEM solo excluyen cationes en concentraciones muy bajas.

Según la revisión de Santoro et al. (2022) las estructuras de membrana más citadas en la literatura y utilizadas para los AEM incluyen: polietileno, polisulfona, poliestireno, polibencimidazol, poli(éter cetona), polietilenpirrol-co-polietilencetona, poli(óxido de fenileno), y poli(vinilbenciltrimetilamonio)-b-poli(metilbutileno) y polímeros fluorados. Cabe destacar que Li et al. (2020) han reportado membranas de intercambio aniónico que demostraron un alto rendimiento, dichas membranas están basadas en poli(fluorenil aril piperidinio), polycarbazol y polifenileno alcanzaron densidades de corriente tan altas como 23000, 25700 y 53000 A/m², respectivamente, medidas a 1.8 V, con una muy buena durabilidad.

Asimismo, para Li et al (2019) la durabilidad de los AEM es un factor indispensable para el desarrollo de esta tecnología. De esta forma, su estudio se centra en la oxidación electroquímica del grupo fenilo adsorbido en los catalizadores de desprendimiento de oxígeno, debido a que conduce a la formación de fenol, lo cual deteriora el rendimiento de los electrolizadores AEM. En sus análisis cinéticos muestran que el tipo de catalizador tiene

un impacto significativo en la velocidad de oxidación del fenilo a un potencial de evolución del oxígeno, y los cálculos basados en la teoría del funcional de densidad muestran que la adsorción del fenilo es un factor determinante en dicha oxidación. Por tal razón para mejorar la durabilidad de los electrolizadores AEM, es importante formular nuevos ionómeros con menos grupos fenilo residuales, o crear catalizadores con una menor capacidad de adsorción de fenilo.

Según Xue et al. (2022) la naturaleza electrofílica de los cationes cuaternarios de amonio (cQA), suelen seguir rutas de degradación convencionales, tales como la eliminación de Hofmann y procesos de sustitución nucleofílica. No obstante, la vía de degradación principal puede variar según el entorno químico del nitrógeno cuaternario. Los cQA diseñados adecuadamente ofrecen una protección contra el ataque nucleofílico por parte de los iones hidróxido (OH^-) lo cual mejora la estabilidad alcalina del catión. Lo anterior se logra mediante el aprovechamiento de los efectos de restricción conformacional y geométrica.

Sin embargo, a pesar de las constantes investigaciones y mejoras, Santoro et al. (2022) mencionan que es indispensable mejorar la estabilidad química para prevenir el deterioro de los grupos funcionales (por el ataque de OH^-), mediante una selección cuidadosa de la matriz polimérica y de los grupos funcionales utilizados para el transporte aniónico. Además, se requiere mejorar la estabilidad mecánica para permitir el funcionamiento a presiones más altas, lo que resultaría en la obtención de hidrógeno presurizado a niveles superiores. Esta mejora se puede lograr mediante la reticulación y/o el uso de cargas inorgánicas. Asimismo, añaden que es necesario ajustar la estabilidad térmica para permitir el funcionamiento de los AEM a temperaturas de hasta 90°C , lo que a su vez mejoraría la cinética de los electrodos y la conductividad del AEM. Para disminuir la resistencia óhmica es importante minimizar el grosor del AEM, sin comprometer la estabilidad mecánica, donde se podría usar la micro- y/o nano-estructuración mediante técnicas de litografía. Además, los agentes de intercambio iónico (AEI) deben ser compatibles químicamente con las membranas, y los valores de la capacidad de intercambio iónico (IEC) se deben ajustar para reducir los sobrepotenciales en el transporte de masa.

Xue et al. (2020) demostraron un método sencillo para incrementar la eficiencia de la reacción de evolución de hidrógeno en electrodos de Pt en medios alcalinos mediante la incorporación de grupos Ni-Fe. Como resultado obtuvieron que el sobrepotencial necesario para alcanzar una densidad de corriente de 100 A/cm^2 en una solución de KOH 0,1 M saturada con H_2 se reduce a 70 mV aproximadamente en los modelos de electrodos monocristalinos. Según los autores, estos electrodos modificados superan a cualquier otro electrocatalizador probado en condiciones similares. Así mismo, estudiaron las proporciones de Ni y Fe, su influencia, la cobertura y la naturaleza de los cationes de metales alcalinos en el electrolito. El rendimiento catalítico observado probablemente se debe tanto a la mejora en la disociación del agua en los grupos Ni-Fe como a la posterior adsorción y recombinación óptimas del hidrógeno en los átomos de Pt en el límite Ni-Fe/Pt.

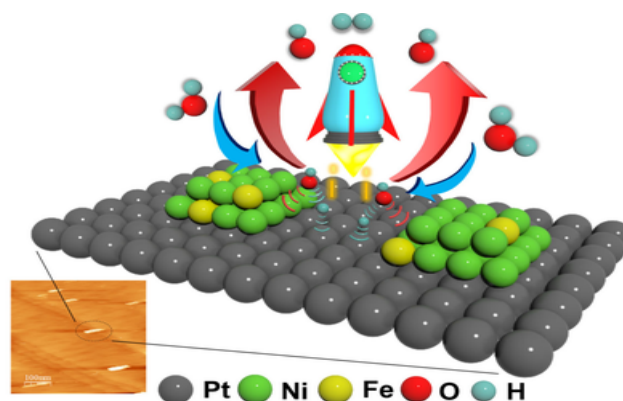


Figura 15. Representación de electrodos Ni-Fe soportados en Pt. Tomado de (Xue et al., 2020)

De igual forma, Park et al. (2021) consideran importante el desarrollo de electrodos eficientes y duraderos para la reacción de evolución de oxígeno (OER) es esencial en la tecnología de electrolizadores de membrana de intercambio aniónico (AEMWE). En su estudio, presentan un diseño de electrodo tridimensional unificado donde se deposita directamente oxihidróxido de níquel-hierro (NiFeOOH) sobre una capa de difusión de gas (GDL) como ánodo para AEMWE. A diferencia de los electrodos convencionales que tienen una capa de catalizador separada y una GDL, este electrodo unificado integra la capa catalítica con la GDL en un solo componente. Se observa que este electrodo unificado tiene una actividad catalítica superior a la de los electrodos convencionales que utilizan NiFe comercial e IrO_2 , y mantiene su actividad estable durante más de 500 horas. La investigación de los parámetros del electrodo muestra un rendimiento excepcional del AEMWE unificado, con una densidad de corriente de 36000 A/m^2 a $1,9 \text{ V}$, que es la más alta reportada en muchos estudios de AEMWE. Además, este electrodo unificado demuestra un rendimiento duradero incluso a densidades de corriente extremadamente altas. Por lo tanto, el diseño de un electrodo unificado ofrece una posible alternativa a los electrodos convencionales para reducir los costos de producción de hidrógeno.

Por otra parte, Lu et al. (2019) desarrollaron nanocables de carbono dopados con rutenio y nitrógeno como catalizadores eficientes para la evolución de hidrógeno. Su desempeño catalítico supera significativamente al del catalizador comercial de platino, con un sobrepotencial de -12 mV para alcanzar una densidad de corriente de 100 A/m^2 en 1 M KOH y -47 mV en 0.1 M KOH . Comparaciones con experimentos de control indican que la destacada actividad se debe principalmente a átomos individuales de rutenio incrustados en la matriz de carbono, con una contribución mínima de las nanopartículas de rutenio. Esto se confirma con cálculos de primeros principios, que muestran que los sitios RuC_xN_x tienen una energía de enlace de hidrógeno mucho menor que las nanopartículas de rutenio y una barrera cinética más baja para la disociación del agua en comparación con el platino. En particular, RuC_2N_2 se destaca como el centro catalítico más activo, con el rutenio y los átomos de carbono adyacentes actuando como posibles sitios activos.

4.3. Comparación de las tecnologías de electrólisis del agua

Según Rodríguez (2022) las tecnologías de electrolizadores más importantes en la actualidad son los de tipo alcalino (AWE), membrana polimérica (PEM o PEMWE) y óxido sólido (SOEC) aunque el nivel de desarrollo tecnológico (TRL por sus siglas en inglés) varía de uno a otro. Cada uno de estos sobresale debido a sus características diferentes. Los electrolizadores alcalinos representan la tecnología más madura. Estos equipos trabajan con un electrolito líquido, presentan mayor desarrollo con respecto a los demás pero su rendimiento es menor. Para el caso de los electrolizadores PEM, presentan un tiempo de arranque rápido a diferencia de los alcalinos, pero sus componentes son de alto costo, específicamente sus membranas y electrocatalizadores. Los electrolizadores de óxido sólido, aunque presentan menor nivel de desarrollo tecnológico, alcanzan rendimientos mayores debido a su capacidad para trabajar a altas temperaturas (1000°C aprox.), pero son limitados debido a los pocos materiales que soportan dicha temperatura. Finalmente, menciona que la principal dificultad de los electrolizadores es la estimación y cuantificación de sus costos, debido a que todavía se encuentran en fase de investigación y desarrollo comercial, por lo cual, no se dispone de la cantidad de datos necesarios. Los costos varían de acuerdo a la tecnología que se emplee, debido a que cada equipo requiere de diseños y materiales diferentes. Es importante mencionar que el autor no menciona los electrolizadores alcalinos de membrana, tal vez por su bajo nivel de madurez tecnológica.

Kumar & Lim (2022) en su revisión realizan un resumen sobre las características técnicas de las tecnologías de electrólisis del agua (Tabla 3) e identifican las brechas que existen entre la investigación y el desarrollo de electrolizadores enfocadas en una perspectiva tecnológica y comercial. Para ello, incluyen los costos de producción de hidrógeno, el desarrollo en materiales de electrodos y sus resultados más exitosos, los rendimientos, limitaciones de algunos electrolizadores y las soluciones para producir hidrógeno de manera rentable. Finalmente, hacen un paralelo de las diferentes tecnologías (Tabla 4) y presentan recomendaciones sobre los tópicos de investigación que cada una de ellas debe abordar en el futuro para llegar a ser competitivas en el mercado.

Tabla 3.

Características técnicas de las tecnologías típicas de electrólisis de agua.

	Alcalino	AEM	PEM	Óxido Sólido
Reacción del ánodo	$2OH^- \rightarrow H_2O + 1/2 O_2$	$4OH^- \rightarrow 2H_2O + O_2 + 4e^-$	$2H_2O \rightarrow 4H^+ + O_2 + 4e^-$	$O^{2-} \rightarrow 1/2 O_2 + 2e^-$
Reacción del cátodo	$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$	$4H_2O + 4e^- \rightarrow 2H_2 + 4OH^-$	$4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2$	$H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + O^{2-}$

Celda en general	$H_2O \rightarrow H_2 + 1/2 O_2$	$H_2O \rightarrow H_2 + 1/2 O_2$	$H_2O \rightarrow H_2 + 1/2 O_2$	$H_2O \rightarrow H_2 + 1/2 O_2$
Electrolito	KOH/NaOH (5 M)	Soporte de polímero DVB con KOH/NaOH (1 M)	Electrolito de polímero sólido (PFSA)	Zirconia estabilizada con itria (YSZ)
Membrana/Separador	Asbesto/Zifón/ Ni	Fumatech	Nafión	Electrolito sólido YSZ
Electrocatalizador or HER	Acero inoxidable perforado revestido de níquel	Níquel	Óxido de Iridio	Ni/YSZ
Electrocatalizador or OER	Acero inoxidable perforado revestido de níquel	Aleación de níquel o Ni-Fe-Co	Carbono/Platino	Perovskitas (LSCF, LSM) (La, Sr, Co, Fe) (La, Sr, Mn)
Capa de difusión de gas	Malla de níquel	Espuma de níquel/Tela de carbón	Malla de titanio/Tela de carbono	Malla/Espuma de níquel
Placas bipolares	Acero inoxidable/Acero inoxidable revestido de níquel	Acero inoxidable/Acero inoxidable revestido de níquel	Platino/Titanio revestido de oro o Titanio	Acero inoxidable revestido de cobalto
Densidad de corriente nominal	2000-8000 A/m ²	2000-20000 A/m ²	10000-20000 A/m ²	3000-10000 A/m ²
Rango de voltaje (límites)	1,4-3,0 V	1,4-2,0 V	1,4-2,5 V	1,0-1,5 V
Temperatura para operar	70-90 °C	40-60 °C	50-80 °C	700-850 °C
Presión de la celda	<30 bares	<30 bares	<70 bares	1 bar
Pureza de H ₂ después del presurizado	99,5-99,9998 %	99,9-99,9999 %	99,9-99,9999 %	99,9%
Eficiencia	50%-78%	57%-59%	50%-83%	89% (laboratorio)

Vida útil del Stack	60000 horas	>30000 horas	50000-80000 horas	20000 horas
Estado de desarrollo	Maduro comercializado y	Investigación desarrollo y	Maduro comercializado y	Investigación desarrollo y
Área del electrodo	10 000-30 000 cm ²	<300 cm ²	1 500 cm ²	200 cm ²
Costo de capital mínimo 1 MW (únicamente el stack)	USD 270/kW	Desconocido	USD 400/kW	>USD 2000/kW
Costo de capital para un electrolizador instalado	USD 2 000/kW	Desconocido	USD 2 450/kW	Desconocido

Adaptado de Kumar & Lim (2022); IEA (2024)

Tabla 4.

Ventajas y desventajas de las tecnologías típicas de electrólisis del agua.

Tecnología de electrólisis	Ventajas	Desventajas
Electrólisis Alcalina	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología bien establecida. • Comercializado para aplicaciones industriales. • Electrocatalizadores libres de metales nobles. • Costo relativamente bajo. • Estabilidad a largo plazo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Densidades de corriente limitadas. • Cruce de gases. • Electrolito líquido altamente concentrado (5M KOH).
Electrolisis AEM	<ul style="list-style-type: none"> • Electrocatalizadores libres de metales nobles. • Electrolito líquido de baja concentración (1M KOH) 	<ul style="list-style-type: none"> • Estabilidad limitada. • En desarrollo.

Electrolisis PEM	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología comercializada. • Opera a densidades de corriente más altas. • Alta pureza de los gases. • Diseño de sistema compacto. • Respuesta rápida. 	<ul style="list-style-type: none"> • Costo de los componentes de la celda. • Electrocatalizadores de metales nobles. • Electrolito ácido.
Electrólisis de Óxido Sólido	<ul style="list-style-type: none"> • Alta temperatura de trabajo. • Alta eficiencia. 	<ul style="list-style-type: none"> • Estabilidad limitada. • En desarrollo.

Tomado de Kumar & Lim (2022).

Jang et al. (2022) en su estudio, realizaron un análisis tecno-económico sobre cuatro tecnologías de producción de hidrógeno verde: electrolizadores alcalinos (AWE), de membrana de intercambio de protones (PEMEC), y de óxido sólido combinada con fuente de calor residual (SOEC (WH)) y de óxido sólido con calentadores de resistencia eléctrica (SOEC (EH)). Lo anterior, con el fin de determinar la tecnología más económica para producir hidrógeno verde. Para calcular el valor neto actual de los cuatro tipos de electrolizadores, realizaron análisis de sensibilidad y aplicaron el método de Monte Carlo. El costo unitario de producción de hidrógeno calculado, osciló entre los 7,16 y 10,16 US\$/kg H₂. El análisis demostró que los sistemas SOEC (WH) presentan una mayor eficiencia de la chimenea y un ahorro sensible de energía térmica, por lo cual pueden adquirir mayor competitividad. El análisis de sensibilidad determinó que es necesario reducir los costos del capital y subsidiar el costo de la electricidad junto con las tasas tributarias, para lograr competir con el hidrógeno gris.

Gerloff (2023) evaluó las principales tecnologías de electrólisis del agua junto con distintos escenarios de costos de energía y teniendo en cuenta variables como el CAPEX de los diferentes tipos de electrolizadores y el OPEX en escenarios presentes, 2030 y 2050, lo cual representa uno de los trabajos más completos hasta el momento en la literatura. Aunque el trabajo se centró en Alemania, la comparación es valiosa y los resultados son extrapolables guardadas ciertas proporciones. El objetivo principal del trabajo fue determinar cuál de las tecnologías de hidrógeno ofrece el menor costo nivelado del hidrógeno (LCOH) para los diferentes escenarios. El estudio concluyó que para plantas de 10 MW y con costos de energía actuales, la tecnología SOEC produce el LCOH más bajo, excepto en el escenario actual de 4000 horas de uso anuales ocupación del equipo con uso de energías renovables (4000h RE). Figura 16. Es importante destacar que incluso en los escenarios más optimistas, con el costo de la energía actual en Europa, el hidrógeno verde tiene un LCOH más alto que el hidrógeno gris, que oscila entre 1 y 2 euros/kg.

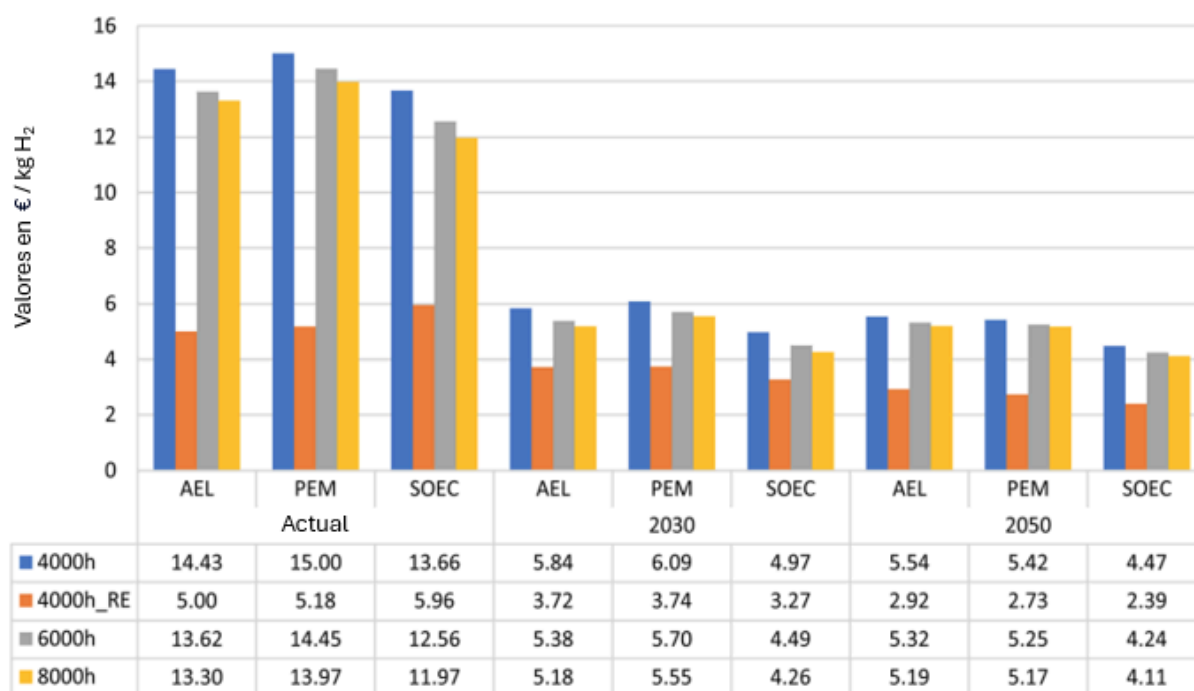


Figura 16. LCOH para diferentes escenarios. Adaptado de (Gerloff, 2023).

El análisis de la composición del LCOH para plantas de 10 MW se observa en la figura 11. Se observa claramente que el costo de la energía es el principal contribuyente al LCOH. Con costos inferiores de la energía se alcanzan escenarios competitivos para el hidrógeno verde. En este contexto, el autor propone dos posibilidades: reducir el LCOH del hidrógeno verde a través de subsidios y/o aumentar el LCOH del hidrógeno producido de manera convencional a través de la penalización del dióxido de carbono emitido para hacer que el hidrógeno verde sea más atractivo. Por un lado, se sugiere utilizar los subsidios a los combustibles fósiles, que ascendieron a unos 16 mil millones de euros en 2021 y son difíciles de justificar en tiempos de cambio climático, para reducir los precios de la electricidad destinada a la producción de hidrógeno verde.

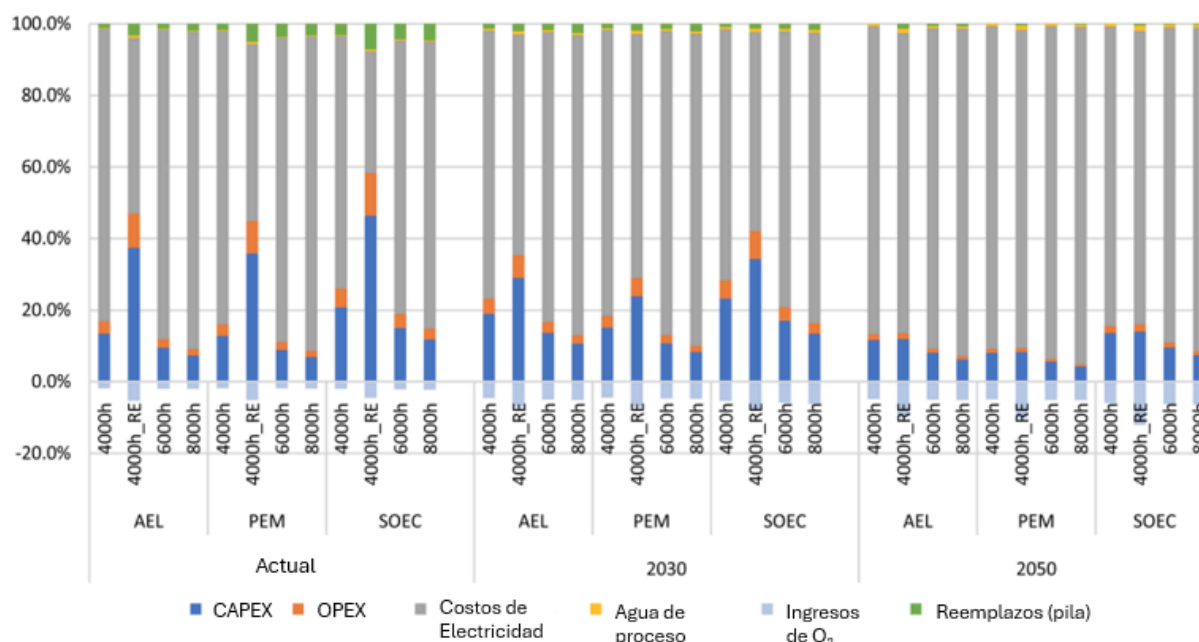


Figura 17. Composición del LCOH para diferentes escenarios Tomada de (Gerloff, 2023).

4.4. Perspectivas del uso de electrolizadores en Colombia

En Julio de 2024 IRENA (IRENA, 2024) publicó la más reciente estrategia para el desarrollo del hidrógeno verde, resaltando una vez más que el hidrógeno verde será responsable por el 12% de la disminución total en gases de efecto invernadero necesaria para alcanzar la meta que la humanidad se ha trazado que es de 34,2 gigatoneladas anuales de dióxido de carbono para el año 2050. Pese a la controversia que ha planteado el uso del hidrógeno en sectores como el transporte, sigue siendo indudable la necesidad de emplear una alternativa sostenible en sectores como la industria y la producción de fertilizantes. La estrategia destaca que Colombia jugará un papel decisivo en esta estrategia mundial. De hecho, solo seis países, por su ubicación geográfica y su potencial de producción pueden fungir como “hubs” de producción y distribución de hidrógeno verde y Colombia es uno de ellos.

Según Tapia et al. (2018) Colombia cuenta con una posición geográfica y recursos naturales privilegiados. Las cadenas montañosas del país permiten la existencia de diversos ecosistemas a distintas altitudes. Un ejemplo es el ecosistema del páramo, que en Colombia alberga el 50% de su totalidad y tiene la capacidad de capturar hasta el 85% del agua potable nacional. Esto contribuye a que más del 70% de la electricidad en Colombia se genere a partir de fuentes hidroeléctricas. Según Pinilla (2022) en Colombia se están explorando nuevos recursos verdes como la energía solar y eólica para apoyar la transición energética. En 2004, se inauguró el primer parque eólico terrestre en la región de la Guajira, donde los vientos alcanzan velocidades de 8 a 10 m/s a 80 metros de altura, casi el doble

del promedio mundial. Esta área del norte del país podría albergar una capacidad instalada de hasta 25 GW en tierra. En cuanto a la energía eólica marina, la intensidad del viento en la costa caribeña de Colombia, las velocidades superan los 10 m/s a 150 metros sobre el nivel del mar, y los factores de capacidad pueden llegar a 65-69%. En contraste, la costa occidental de Colombia tiene vientos de hasta 6 m/s y factores de capacidad más bajos. El centro del país también cuenta con recursos eólicos que pueden alcanzar factores de capacidad del 60%. Es importante mencionar que con el aumento del tamaño de las turbinas y las mejoras tecnológicas, los factores de capacidad pueden incrementarse. Por ejemplo, las turbinas de 1.5 MW del año 2000 tienen un factor de capacidad del 30%, mientras que las turbinas actuales de 5 MW pueden alcanzar el 38%. Actualmente, solo existe un parque eólico terrestre de 17.5 MW, pero se planea aumentar el número de estos parques.

Del mismo modo, Colombia se encuentra ubicada en la línea del ecuador, lo cual permite que la radiación solar sea mayor que el promedio. Por ejemplo, la región de la Guajira y parte del norte del país experimentan niveles de radiación solar comparables con algunas áreas del desierto del Sahara, con estimaciones cercanas a 6 kWh/m²/día. Otras áreas del país registran valores que varían entre 3,6 kWh/m²/día y 4,7 kWh/m²/día, con una disponibilidad del sol que oscila entre 4,8 y 12 horas (Cooperación Alemana, 2021).

Colombia cuenta con óptimos recursos verdes y está avanzando hacia su aprovechamiento. Su meta es convertirse en el principal exportador latinoamericano de hidrógeno verde para el año 2030. Este es un desafío considerable, dado que se espera que Chile sea el país más competitivo y fuerte en América del Sur en este sector. Colombia publicó su Hoja de Ruta del Hidrógeno hace pocos años y recientemente ha comenzado dos proyectos piloto de electrólisis en el departamento de Bolívar (Mesa, 2022).

Benalcazar & Komorowska (2024) en su revisión, señalan que pese a que Colombia, junto con Australia, Marruecos y Chile, es uno de los países con mayor potencial de producción de hidrógeno verde, no hay investigaciones que examinen el costo nivelado del hidrógeno producido mediante electrólisis en instalaciones a gran escala alimentadas por energía solar o eólica. Además, los estudios existentes emplean un número limitado de escenarios de investigación, capturando solo conjuntos específicos de supuestos y ofreciendo una gama restringida de posibles resultados. Por lo tanto, es crucial ampliar la evaluación del costo nivelado del hidrógeno en los países de América del Sur utilizando enfoques estocásticos que proporcionen evaluaciones probabilísticas de la incertidumbre y exploren una variedad más amplia de resultados posibles. Esta situación, encadenada con el papel protagónico que adquiere Colombia en la última estrategia de IRENA, resalta la pertinencia de estudios por parte de los investigadores del país sobre las tecnologías más aptas para la producción de hidrógeno verde.

5. Conclusiones

Este trabajo destaca la relevancia del hidrógeno verde como un elemento clave para la transición energética hacia una economía baja en carbono. La producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables, mediante procesos como la electrólisis, presenta ventajas significativas en términos de sostenibilidad y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con los métodos convencionales. Sin embargo, se identifican varios desafíos que deben abordarse para su implementación a gran escala, como la necesidad de reducir los costos de producción, mejorar la eficiencia de los electrolizadores y el aumento de la disponibilidad de infraestructura de almacenamiento y distribución.

El análisis de las tecnologías actuales para la producción de hidrógeno verde, electrolizadores alcalinos, PEM, de óxidos sólidos (SOEC) y de membrana de intercambio aniónico (AEM), muestra que cada una tiene características específicas que son adecuadas para distintas aplicaciones. Los electrolizadores alcalinos se destacan por su bajo costo y su madurez tecnológica, y una opción viable para proyectos a gran escala. Sin embargo, su menor eficiencia energética y su respuesta limitada a la variabilidad de la energía renovable representan un gran desafío. Por otra parte, los electrolizadores PEM son ideales para aplicaciones donde se requiere alta pureza de hidrógeno y rápida capacidad de respuesta. Sin embargo, su costo sigue siendo un desafío, debido a la dependencia de metales preciosos como platino e iridio, lo que limita su competitividad en escalas mayores. Los SOEC ofrecen una alta eficiencia al operar a temperaturas elevadas, lo que les permite alcanzar eficiencias cercanas al 90%. Son útiles en aplicaciones industriales que requieren estas temperaturas y tienen el potencial de realizar la electrólisis de vapor de agua y dióxido de carbono, posibilitando la producción de combustibles sintéticos. A pesar de estas ventajas, el costo de los materiales y la complejidad técnica siguen siendo un limitante para su implementación masiva. Los electrolizadores AEM, aunque en una etapa de desarrollo menos madura, combinan aspectos positivos de los sistemas alcalinos y PEM, con la ventaja de no depender de catalizadores de metales preciosos, lo que reduce costos. Sin embargo, los desafíos relacionados con la durabilidad de las membranas y la eficiencia aún deben ser superados antes de su adopción generalizada. Los avances recientes en estas tecnologías contribuyen a mejorar la viabilidad técnica y económica. No obstante, los desafíos en términos de eficiencia energética, costos de materiales y escalabilidad, siguen limitando el despliegue masivo de estas tecnologías a nivel global.

En cuanto al contexto colombiano, el país cuenta con un gran potencial para el desarrollo del hidrógeno verde debido a su abundancia de recursos renovables, como la energía solar y eólica. Sin embargo, es necesario desarrollar políticas públicas sólidas, fomentar la inversión y establecer alianzas estratégicas para impulsar la investigación y la infraestructura necesaria para adoptar la producción y uso del hidrógeno verde. La comparación con las hojas de ruta de otros países evidencia la importancia de establecer metas claras y adoptar un enfoque integral para superar las barreras tecnológicas y económicas.

Bibliografía

- Abanades. (2019). Metal Oxides Applied to Thermochemical Water-Splitting for Hydrogen Production Using Concentrated Solar Energy. *ChemEngineering*, 3(3), 63. doi:10.3390/chemengineering3030063
- Abdin, Z., Zafaranloo, A., Rafiee, A., Mérida, W., Lipiński, W., & Khalilpour, K. R. (2020). Hydrogen as an energy vector. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 120). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109620>
- Ahmad, H., Kamarudin, S., Minggu, L. & Kassim, M. (2015). Hydrogen from photo-catalytic water splitting process: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 599-610
- Ahmed, K., Jang, M., Park, M., Chen, Z., & Fowler, M. (2022). Effect of components and operating conditions on the performance of PEM electrolyzers: A review. *Electrochem*, 3(4), 581-612
- Amin, M., Shah, H. H., Bashir, B., Iqbal, M. A., Shah, U. H., & Ali, M. U. (2023). Environmental Assessment of Hydrogen Utilization in Various Applications and Alternative Renewable Sources for Hydrogen Production: A Review. In *Energies* (Vol. 16, Issue 11). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en16114348>
- Anantharaman, A., & Dasari, H. (2021). Potential of pyrochlore structure materials in solid oxide fuel cell applications. *Ceramics International*, 47(4), 4367-4388
- Azizan, M. T., Aqsha, A., Ameen, M., Syuhada, A., Klaus, H., Abidin, S. Z., & Sher, F. (2020). Catalytic reforming of oxygenated hydrocarbons for the hydrogen production: an outlook. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-24
- Baratov, S., Filonova, E., Ivanova, A., Hanif, M. B., Irshad, M., Khan, M. Z., ... & Medvedev, D. (2024). Current and further trajectories in designing functional materials for solid oxide electrochemical cells: A review of other reviews. *Journal of Energy Chemistry*
- Benalcazar, P., & Komorowska, A. (2024). Techno-economic analysis and uncertainty assessment of green hydrogen production in future exporting countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 199, 114512
- Boscherini, M., Storione, A., Minelli, M., Miccio, F., & Doghieri, F. (2023). New perspectives on catalytic hydrogen production by the reforming, partial oxidation and decomposition of methane and biogas. *Energies*, 16(17), 6375
- Brauns, J., & Turek, T. (2020). Alkaline Water Electrolysis Powered by Renewable Energy: A Review. *Processes*, 8(2), 248. doi:10.3390/pr8020248
- Bukowski, M. (2022). Green hydrogen hype or beacon of hope? Opportunities, risks and strategies for green hydrogen and a just transition in the Global South. *Boell.de*.

https://www.boell.de/sites/default/files/2022-08/green_hydrogen_-_hype_or_beacon_of_hope.pdf

Cabrales, S. & Delgado, M. (2022). Transición energética en Colombia: Política, costos de la carbono-neutralidad acelerada y papel del gas natural. Fedesarrollo. <http://hdl.handle.net/11445/4318>

Castiblanco, O. & Cárdenas, D. (2020). Producción de hidrógeno y su perspectiva en Colombia: una revisión. *Gestión y Ambiente*, 23(2), 299–311. <https://doi.org/10.15446/ga.v23n2.86466>

Chatterjee, S., Peng, X., Intikhab, S., Zeng, G., Kariuki, N. N., Myers, D. J., ... & Snyder, J. (2021). Nanoporous iridium nanosheets for polymer electrolyte membrane electrolysis. *Advanced Energy Materials*, 11(34), 2101438

Chen, Z., Guo, L., Pan, L., Yan, T., He, Z., Li, Y., ... & Zou, J. J. (2022). Advances in oxygen evolution electrocatalysts for proton exchange membrane water electrolyzers. *Advanced Energy Materials*, 12(14), 2103670

Chi, J., & Yu, H. (2018). Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production. *Chinese Journal of Catalysis*, 39(3), 390-394

Chica, A., Fernández, A., Fernández, J. R., Grasa, G., Laguna-Bercero, M. A., Lázaro, M. J., ... & Valiño, L. (2020) Tecnologías del Hidrógeno. *Boletín Grupo Español Carbón*

Choudhary, B., Besra, L., Anwar, S., & Anwar, S. (2023). La₂Ce₂O₇ based materials for next generation proton conducting solid oxide cells: Progress, opportunity and future prospects. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(73), 28460-28501

Congreso de la República. (2021). Ley 2099 del 2021. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=166326

Cooperación Alemana. (2021). Implementación de fuentes no convencionales de energías renovables (FNCER) en el sector minero colombiano. Cooperación Regional para la gestión sustentable de los recursos mineros en los países andinos

Council of Australian Governments. (2019). Australia's national hydrogen strategy. COAG Energy Council Hydrogen Working Group

Das, A., & Peu, SD (2022). Una revisión exhaustiva de los avances recientes en los procesos termoquímicos para la producción de hidrógeno limpio con el fin de descarbonizar el sector energético. *Sustainability*, 14 (18), 11206

Dash, S., Chakraborty, S., & Elangovan, D. (2023). A brief review of hydrogen production methods and their challenges. *Energies*, 16(3), 1141

Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water. (2023). National Hydrogen Strategy Review. The Australian Government

- Flores, E. (2020). Estado del arte de electrolizadores de óxido sólido. (Trabajo Fin de Grado Inédito). Universidad de Sevilla, Sevilla. <https://hdl.handle.net/11441/101318>
- Fop, S. (2021). Solid oxide proton conductors beyond perovskites. *Journal of Materials Chemistry A*, 9(35), 18836-18856
- Gerloff, N. (2023). Economic analysis of hydrogen production in Germany with a focus on green hydrogen, considering all three major water electrolysis technologies. *Sustainable Energy & Fuels*, 7(8), 1893-1907
- Giménez, I. (2021). Retos del hidrógeno verde. *Economía aragonesa*, (73), 103-129
- Grigoriev, S., Fateev, V., Bessarabov, D. & Millet, P. (2020). Current status, research trends, and challenges in water electrolysis science and technology. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(49), 26036-26058. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.109>
- Groot, M., Kraakman, J., & Barros, R. (2022). Optimal operating parameters for advanced alkaline water electrolysis. *International journal of hydrogen energy*, 47(82), 34773-34783
- Gulli, C., Heid, B., Noffsinger, J., Waardenburg, M. & Wilthaner, M. (2023). Global Energy Perspective 2023: Hydrogen outlook. McKinsey Energy Solutions. <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2023-hydrogen-outlook>
- Henkensmeier, D., Najibah, M., Harms, C., Žitka, J., Hnát, J., & Bouzek, K. (2021). Overview: State-of-the art commercial membranes for anion exchange membrane water electrolysis. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*, 18(2), 024001
- Hyodo, J., Kitabayashi, K., Hoshino, K., Okuyama, Y., & Yamazaki, Y. (2020). Fast and stable proton conduction in heavily scandium-doped polycrystalline barium zirconate at intermediate temperatures. *Advanced Energy Materials*, 10(25), 2000213
- IEA (2019). The Future of Hydrogen. International Energy Agency, Paris. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>, License: CC BY 4.0
- IEA (2023a). Hydrogen. International Energy Agency, Paris. <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/hydrogen>
- IEA. (2023b). Global Hydrogen Review 2023. Disponible en: www.iea.org
- IEA. (2024). Global Hydrogen Review 2024, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>, Licence: CC BY 4.0
- IEAGHG. (2024). Gold, Geologic, White, Native, Hidden, Natural Hydrogen: Does Earth hold extensive stores of untapped, carbon-free fuel?. doi.org/10.62849/2024-IP05

IRENA (2020), Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi

IRENA (2024), Green hydrogen strategy: A guide to design, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi

Jang, H., & Lee, J. (2020). Iridium oxide fabrication and application: A review. *Journal of Energy Chemistry*, 46, 152-172

Jang, D., Kim, J., Kim, D., Han, W., & Kang, S. (2022). Techno-economic analysis and Monte Carlo simulation of green hydrogen production technology through various water electrolysis technologies. *Energy Conversion and Management*, 258, 115499

Jiang, G., Yu, H., Hao, J., Chi, J., Fan, Z., Yao, D., ... & Shao, Z. (2019). An effective oxygen electrode based on Ir_{0.6}Sn_{0.4}O₂ for PEM water electrolyzers. *Journal of Energy Chemistry*, 39, 23-28

Jiang, G., Yu, H., Li, Y., Yao, D., Chi, J., Sun, S., & Shao, Z. (2021). Low-loading and highly stable membrane electrode based on an Ir@WO_x/NR ordered array for PEM water electrolysis. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(13), 15073-15082

Jiang, L., Wei, T., & Huang, Y. (2022). double-perovskite electrode design strategies and research progress for SOFCs. *Journal of The Electrochemical Society*, 169(6), 064508

Jiménez, F. (2020). Evaluación técnica y económica del uso de hidrógeno verde en aplicaciones para la industria y desplazamiento de combustible fósil. Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/175586>

Jin, H., Ruqia, B., Park, Y., Kim, H., Oh, S., Choi, S., & Lee, K. (2020). Nanocatalyst design for long-term operation of proton/anion exchange membrane water electrolysis. *Advanced Energy Materials*, 11(4), 2003188

Ju, H., Badwal, S., Giddey, S., (2018). A comprehensive review of carbon and hydrocarbon assisted water electrolysis for hydrogen production. *Appl. Energy* 231, 502-33. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.09.125

Kilner, J. (2022). Métodos de producción de hidrógeno y sus colores. CICenergigUNE. <https://cicenergigune.com/es/blog/metodos-produccion-hidrogeno-colores>

Klyndyuk, A. I., Chizhova, E. A., Kharytonau, D. S., & Medvedev, D. A. (2021). Layered oxygen-deficient double perovskites as promising cathode materials for solid oxide fuel cells. *Materials*, 15(1), 141

Kovač, A., Paranos, M., & Marciuš, D. (2021). Hydrogen in energy transition: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(16), 10016–10035. doi:10.1016/j.ijhydene.2020.11.256

- Kumar, R. V., & Khandale, A. P. (2022). A review on recent progress and selection of cobalt-based cathode materials for low temperature-solid oxide fuel cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 156, 111985
- Kumar, S., & Lim, H. (2022). An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. *Energy reports*, 8, 13793-13813
- Lamb, J., Hillestad, M., Rytter, E., Bock, R., Nordgård, A, Lien, K, Burheim y Pollet, B. (2020). Rutas tradicionales para la producción de hidrógeno y la conversión de carbono. En *Hidrógeno, biomasa y bioenergía* (págs. 21-53). Prensa académica
- Li, D., Matanovic, I., Lee, A. S., Park, E. J., Fujimoto, C., Chung, H. T., & Kim, Y. S. (2019). Phenyl oxidation impacts the durability of alkaline membrane water electrolyzer. *ACS applied materials & interfaces*, 11(10), 9696-9701
- Li, D., Park, E. J., Zhu, W., Shi, Q., Zhou, Y., Tian, H., ... & Kim, Y. S. (2020). Highly quaternized polystyrene ionomers for high performance anion exchange membrane water electrolyzers. *Nature Energy*, 5(5), 378-385
- Li, W., Tian, H., Ma, L., Wang, Y., Liu, X., & Gao, X. (2022). Low-temperature water electrolysis: fundamentals, progress, and new strategies. *Materials Advances*, 3(14), 5598-5644
- Liang, N. N., Han, D. S., & Park, H. (2023). Membraneless unbuffered seawater electrolysis for pure hydrogen production using PtRuTiOx anode and MnOx cathode pairs. *Applied Catalysis B: Environmental*, 324, 122275
- Liebreich, M. (2021). The Clean Hydrogen Ladder [Now updated to V4.1]. Liebreich Associates
- Lim, A., Kim, J., Jin Lee, H., Kim, H.-J., Jong Yoo, S., Jang, J. H., ... Park, H. S. (2020). Low-loading IrO₂ Supported on Pt for Catalysis of PEM Water Electrolysis and Regenerative Fuel Cells. *Applied Catalysis B: Environmental*, 118955. doi:10.1016/j.apcatb.2020.118955
- Liu, C., Shviro, M., Gago, A. S., Zaccarine, S. F., Bender, G., Gazdzicki, P., ... & Carmo, M. (2021a). Exploring the Interface of skin-layered titanium fibers for electrochemical water splitting. *Advanced Energy Materials*, 11(8), 2002926
- Liu, C., Wippermann, K., Rasinski, M., Suo, Y., Shviro, M., Carmo, M., & Lehnert, W. (2021b). Constructing a multifunctional interface between membrane and porous transport layer for water electrolyzers. *ACS applied materials & interfaces*, 13(14), 16182-16196
- Lu, B., Guo, L., Wu, F., Peng, Y., Lu, J. E., Smart, T. J., ... & Chen, S. (2019). Ruthenium atomically dispersed in carbon outperforms platinum toward hydrogen evolution in alkaline media. *Nature communications*, 10(1), 631
- Lv, H., Wang, S., Li, J., Shao, C., Zhou, W., Shen, X., Xue, M, & Zhang, C. (2020). Self-assembled RuO₂@IrOx core-shell nanocomposite as high efficient anode

catalyst for PEM water electrolyzer. *Applied Surface Science*, 145943. doi:10.1016/j.apsusc.2020.145943

Maiti, T., Majhi, J., Maiti, S., Singh, J., Dixit, P., Rohilla, T., ... & Chattopadhyay, S. (2022). Zirconia-and ceria-based electrolytes for fuel cell applications: critical advancements toward sustainable and clean energy production. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(43), 64489-64512

Martínez, D. (2023). Perspectivas del Hidrógeno Verde como un vector energético del futuro. <https://doi.org/10.33936/revbasdelaciencia.v8i2>

Martínez, G., Martínez, M., & Téllez, A. (2022) Hidrógeno: tecnologías de producción, almacenamiento y aplicaciones. Consejo Ejecutivo, 100

Mathur, L., Namgung, Y., Kim, H., & Song, S. J. (2023). Recent progress in electrolyte-supported solid oxide fuel cells: a review. *Journal of the Korean Ceramic Society*, 60(4), 614-636

Mesa, J. (2022). Hidrógeno verde: un proyecto piloto que le abre la puerta a la transición energética. *Revista Protección & Seguridad* No. 405. pág. 31-34. Consejo Colombiano de Seguridad

Milani, D., Kiani, A., & McNaughton, R. (2020). Renewable-powered hydrogen economy from Australia's perspective. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(46), 24125-24145

Ministerio de Ambiente. (2020). Actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (NDC). Gov.co. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/informe-actualizacion-contribucion-determinada-Colombia-ndc-2020.pdf>

Ministerio de Energía-Gobierno de Chile. (2020). Estrategia Nacional Hidrógeno Verde

Ministerio de Minas y Energía-República de Colombia. (2022). Diálogo social para definir la hoja de ruta para la Transición Energética Justa en Colombia. <https://bit.ly/HojaRutaTransicionEnergeticaJustaCO>

Ministerio de Minas y Energía-República de Colombia. (2021). Hoja de ruta del Hidrógeno en Colombia. https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia_2810.pdf

Miranda, E. & Londoño, A., (2022). Evaluación de un prototipo de electrolizador de bajo costo para la producción de hidrógeno (Bachelor 's thesis, Universidad EAFIT)

MITERD. (2020). Hoja de ruta del hidrógeno: Una apuesta por el hidrógeno renovable. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. https://energia.gob.es/es-es/Novidades/Documents/hoja_de_ruta_del_hidrogeno.pdf

- Mittelsteadt, C., Norman, T., Rich, M., & Willey, J. (2015). PEM electrolyzers and PEM regenerative fuel cells industrial view. In *Electrochemical energy storage for renewable sources and grid balancing* (pp. 159-181). Elsevier
- Morante, J., Andreu, T., García, G., Guilera, J., Tarancón, A., & Torrell, M. (2020). *Hidrógeno, vector energético de una economía descarbonizada*. Fundación Naturgy, Madrid, España
- Mukerjee, S., Yan, Y., & Xu, H. (2021). Hydrogen at scale using low-temperature anion exchange membrane electrolyzers. *The Electrochemical Society Interface*, 30(4), 73
- Muñoz, J., Beleño, W., & Díaz, H. (2022). Análisis del potencial del uso de hidrógeno verde para reducción de emisiones de carbono en Colombia. *Fuentes, El reventón energético*, 20(1), 57–72. <https://doi.org/10.18273/revfue.v20n1-2022006>
- Navarro, L. (2024). *Producción de hidrógeno a partir de energía eléctrica: Electrolizadores de alta y baja temperatura*
- Nikolaidis, P., & Poullikkas, A. (2017). A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 597-611. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>
- Park, J. E., Park, S., Kim, M. J., Shin, H., Kang, S. Y., Cho, Y. H., & Sung, Y. E. (2021). Three-dimensional unified electrode design using a NiFeOOH catalyst for superior performance and durable anion-exchange membrane water electrolyzers. *ACS Catalysis*, 12(1), 135-145
- Patterson, J. D., Aydin, M., Crotwell, A. M., Petron, G., Severinghaus, J. P., & Saltzman, E. S. (2020). Atmospheric history of H₂ over the past century reconstructed from South Pole firn air. *Geophysical Research Letters*, 47(14), e2020GL087787
- Pinilla, A. (2020). *Notas de lectura-Curso electivo de aerodinámica*. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes, Bogotá
- Posdziech, O., Schwarze, K., & Brabandt, J. (2019). Efficient hydrogen production for industry and electricity storage via high-temperature electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(35), 19089-19101
- PRAXAIR. (2015). *Hidrógeno comprimido. Hoja de datos de seguridad*. México. <https://www.linde.mx/-/media/corporate/praxair-mexico/documents/safety-data-sheets/hidrogeno-hds-p4604-2015.pdf>
- Puga, C., Liberona, F., & Toledo, F. (2024). *PRODUCCIÓN, CONSUMO E IMPACTOS SOCIOAMBIENTALES DEL HIDRÓGENO*. Fundación Terram
- Rasaki, S. A., Liu, C., Lao, C., & Chen, Z. (2021). A review of current performance of rare earth metal-doped barium zirconate perovskite: The promising electrode and electrolyte material for the protonic ceramic fuel cells. *Progress in Solid State Chemistry*, 63, 100325

Rondán, J. (2016). Automatización, Operación y Caracterización de un Electrolizador AEM. Trabajo Fin de Grado, Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería Energética, Sevilla. <http://hdl.handle.net/11441/55154>

Rodríguez, E. (2022). Electrolizadores: Análisis, Perspectivas de Mercado y Comparación. (Trabajo Fin de Grado Inédito). Universidad de Sevilla, Sevilla

Sahini, M. G., Mwankemwa, B. S., & Kanas, N. (2022). BaxSr_{1-x}CoyFe_{1-y}O_{3-δ} (BSCF) mixed ionic-electronic conducting (MIEC) materials for oxygen separation membrane and SOFC applications: insights into processing, stability, and functional properties. *Ceramics International*, 48(3), 2948-2964

Sand, M., Skeie, R. B., Sandstad, M., Krishnan, S., Myhre, G., Bryant, H., ... & Stevenson, D. (2023). A multi-model assessment of the Global Warming Potential of hydrogen. *Communications Earth & Environment*, 4(1), 203

Santoro, C., Lavacchi, A., Mustarelli, P., Di Noto, V., Elbaz, L., Dekel, D. R., & Jaouen, F. (2022). What is next in anion-exchange membrane water electrolyzers? Bottlenecks, benefits, and future. *ChemSusChem*, 15(8), e202200027

Saxena, R., Adhikari, D., & Goyal, H. (2009). Biomass-based energy fuel through biochemical routes: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(1), 167-178

Schuler, T., Ciccone, J. M., Krentscher, B., Marone, F., Peter, C., Schmidt, T. J., & Büchi, F. N. (2020). Hierarchically structured porous transport layers for polymer electrolyte water electrolysis. *Advanced Energy Materials*, 10(2), 1903216

Servicio Geológico Colombiano. (2023). Hidrógeno blanco: el combustible limpio del futuro. Recuperado de <https://www2.sgc.gov.co/Noticias/Paginas/Hidrogeno-blanco-el-combustible-limpio-de-l-futuro.aspx>

Sivaramakrishnan, R., Shanmugam, S., Sekar, M., Mathimani, T., Incharoensakdi, A., Kim, S., y Pugazhendhi, A. (2021). Información sobre las rutas biológicas de producción de hidrógeno y microorganismos potenciales para un alto rendimiento de hidrógeno. *Combustible*, 291, 120136

Solovey, V. V., Shevchenko, A. A., Zipunnikov, M. M., Kotenko, A. L., Khiem, N. T., Tri, B. D., & Hai, T. T. (2022). Development of high pressure membraneless alkaline electrolyzer. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(11), 6975-6985

Soto, O. (2020). Análisis conceptual, constructivo y experimental de un electrolizador con diferentes electrodos, para la obtención de hidrógeno desde agua pura y salada

Tapia, J., Lee, J., Ooi, R., Foo, C., & Tan, R. (2018). A review of optimization and decision-making models for the planning of CO₂ capture, utilization and storage (CCUS) systems. *Sustainable Production and Consumption*, 13, 1-15

- Tarasova, N. A., Animitsa, I. E., Galisheva, A. O., & Medvedev, D. A. (2022). Layered and hexagonal perovskites as novel classes of proton-conducting solid electrolytes. A focus review. *Electrochemical Materials and Technologies*, 1(1), 20221004
- Tarutina, L. R., Gordeeva, M. A., Matkin, D. E., Akopian, M. T., Starostin, G. N., Kasyanova, A. V., ... & Shao, Z. (2024). Why do BaCo_{0.4}Fe_{0.4}Zr_{0.1}Y_{0.1}O_{3-δ}-derived complex oxides become one of the most promising electrodes for protonic ceramic electrochemical cells? An explanatory review. *Chemical Engineering Journal*, 151615
- Tong, X., Hendriksen, P. V., Hauch, A., Sun, X., & Chen, M. (2020). An up-scalable, infiltration-based approach for improving the durability of Ni/YSZ electrodes for solid oxide cells. *Journal of The Electrochemical Society*, 167(2), 024519
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2015). Plan Energético Nacional Colombia: Ideario Energético 2050. UPME. http://www.upme.gov.co/docs/pen/pen_idearioenergetico2050.pdf
- Vera, C. Y. R., Ding, H., Peterson, D., Gibbons, W. T., Zhou, M., & Ding, D. (2021). A mini-review on proton conduction of BaZrO₃-based perovskite electrolytes. *Journal of Physics: Energy*, 3(3), 032019
- Vincent, I., Lee, E. & Kim, H. (2021). Comprehensive impedance investigation of low-cost anion exchange membrane electrolysis for large-scale hydrogen production. *Sci Rep* 11, 293. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80683-6>
- Wang, T., Cao, X., & Jiao, L. (2022). PEM water electrolysis for hydrogen production: fundamentals, advances, and prospects. *Carbon Neutrality*, 1(1), 21
- Warwick, N. J., Archibald, A. T., Griffiths, P. T., Keeble, J., O'Connor, F. M., Pyle, J. A., & Shine, K. P. (2023). Atmospheric composition and climate impacts of a future hydrogen economy. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(20), 13451-13467
- Wei, S., Sacchi, R., Tukker, A., Suh, S., & Steubing, B. (2024). Future environmental impacts of global hydrogen production. *Energy & Environmental Science*, 17(6), 2157-2172
- Wu, C., Wang, Z., Huang, J. & Williams, P.T. (2013). Pyrolysis/gasification of cellulose, hemicellulose and lignin for hydrogen production in the presence of various nickel-based catalysts. *Fuel*. 106: 697-706
- Xiang, P., Ismail, S. A., Guo, S., Jiang, L., & Han, D. (2024). Fluorite-based proton conducting oxides: structures, materials and applications. *Materials Advances*, 5(1), 12-29
- Xue, J., Zhang, J., Liu, X., Huang, T., Jiang, H., Yin, Y., ... & Guiver, M. D. (2022). Toward alkaline-stable anion exchange membranes in fuel cells: cycloaliphatic quaternary ammonium-based anion conductors. *Electrochemical Energy Reviews*, 1-53

Xue, S., Haid, R. W., Kluge, R. M., Ding, X., Garlyyev, B., Fichtner, J., ... & Bandarenka, A. S. (2020). Enhancing the hydrogen evolution reaction activity of platinum electrodes in alkaline media using nickel–iron clusters. *Angewandte Chemie International Edition*, 59(27), 10934-10938

Xunta de Galicia. (2022). El Hidrógeno Verde. Antena del IGAPE en Marruecos

Yang, X., Wang, S. & He, Y. (2022). Review of catalytic reforming for hydrogen production in a membrane-assisted fluidized bed reactor. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 154: 111832

Yujing, G., Gendi, L., Junbo, Z. & Yong L. (2019). Comparison between hydrogen production by alkaline water electrolysis and hydrogen production by PEM electrolysis. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 371, No. 4, p. 042022). IOP Publishing

Zappia, M. I., Bellani, S., Zuo, Y., Ferri, M., Drago, F., Manna, L., & Bonaccorso, F. (2022). High-current density alkaline electrolyzers: The role of Nafion binder content in the catalyst coatings and techno-economic analysis. *Frontiers in Chemistry*, 10, 1045212

Zhang, C., Yang, X., Yi, M., Yang, Y., & Chen, Y. (2022). Assessing the efficiency and sustainability of three eco-campus systems in Northwestern China using a comprehensive evaluation framework. *Energy Reports*, 8, 187-204

Zheng, F., & Pang, S. (2023). Progress in developing $\text{LnBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$ as an oxygen reduction catalyst for solid oxide fuel cells. *Catalysts*, 13(9), 1288

Zheng, Y., Zhang, F., Wang, G., Lai, D., Zou, L., Cheng, Q., ... & Yang, H. (2022). CO induced phase-segregation to construct robust and efficient $\text{IrRu}_x@ \text{Ir}$ core-shell electrocatalyst towards acidic oxygen evolution. *Journal of Power Sources*, 528, 231189