

Innovaciones tecnológicas en CATALIZADORES y MEMBRANAS



CONVENIO INTERADMINISTRATIVO ENTRE ANH Y LA UNIVERSIDAD DE CARTAGENA.

CONTRATO 526 DE 2024. CONTRATAR EL DISEÑO, EVALUACIÓN Y LA IMPLEMENTACIÓN A ESCALA DE LABORATORIO INTEGRAL DE LA METODOLOGÍA AVANZADAS PARA LA PRODUCCIÓN, CUANTIFICACIÓN Y ALMACENAMIENTO QUÍMICO DE HIDRÓGENO VERDE A PARTIR DE AGUA DE MAR EN EL DISTRITO TURÍSTICO Y CULTURAL DE CARTAGENA DE INDIAS, COLOMBIA.

ENTREGABLE No 3. INFORME SOBRE INNOVACIONES TECNOLÓGICAS INTEGRADAS EN CATALIZADORES Y MEMBRANAS

Coordinador: Dr. Joaquín Hernández F.

Supervisor de la UDC: Dra. Katherine Porto

Supervisor de la ANH: Dra. Carolina Diosa R.

Universidad de Cartagena

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

26 de noviembre de

2024

CONTENIDO

CONTENIDO ___ ***3***

TABLA DE FIGURAS ___ ***5***

ABREVIACIONES ___ ***6***

Resumen Ejecutivo ___ ***7***

Introducción ___ ***9***

Marco Teórico ___ ***13***

2.1. Obtención De Hidrógeno Verde. ___ **13**

2.1.1. Generación De Hidrógeno ___ 13

2.2. Electrólisis Del Agua ___ **17**

2.3. Explicación Técnica De Los Principios De Funcionamiento De Los Tipos De Electrólisis ___ **20**

2.3.1. Electrólisis En Medio Alcalino ___ 20

2.3.1.1. Estudio Y Avance De La Electrólisis En Medio Alcalino ___ 22

2.3.2. División Del Agua Mediante Una Membrana De Transporte Aniónico (AEM) ___ 27

2.3.2.1. Estudio Y Avance De La Electrólisis Usando AEM ___ 28

2.4. Reseña De La Literatura Sobre Las Innovaciones Tecnológicas Más Recientes En Este Campo. ___ **31**

2.4.1. Nuevos Progresos Y Miradas Hacia El Futuro En Cuanto A Catalizadores Utilizados En La Industria Para Generar Hidrógeno Verde En Entornos Alcalinos. ___ 31

2.4.2. Últimos Desarrollos En Tecnología Catalíticas Y Sistemas De Membrana Para La Generación De H_2 ___ 35

2.4.3. Catalizadores Mononucleares En La Reacción Electroquímica De Producción De Hidrógeno: Simulación Por Computadora E Indagación Práctica. ___ 45

2.4.3.1. Enfoques Computacionales De Los SAC Para La Producción De H_2. ___ 48

2.5. Innovaciones en la electrólisis del agua de mar ___ **50**

2.5.1. Catalizadores Electroquímicos Aplicados Para La Electrólisis Del Agua Marina. ___ 52

2.5.2. Materiales Catalíticos Para La OER Aplicados A La Electrólisis De Agua Salina ___ 56

2.5.3. Materiales Catalíticos Para La Evolución De Hidrógeno En Sistemas De Electrólisis De Agua Marina. ___ 58

2.5.4. Equipos Para La Electrólisis De Agua Salina ___ 59

Metodología ___ ***64***

3.1. Reglamentos para el estudio del agua ___ **64**

3.1.2. Fuentes posibles de agua y requisitos de tratamiento ___ 67

3.1.3. Calidad del desempeño de los recursos hídricos en el proceso de electrólisis. ___ 76

3.2. Descripción De Las Pruebas, Estudios o Simulaciones Llevadas A Cabo Para Evaluar Las Innovaciones Tecnológicas. ___ **78**

3.2.1. Retos y Oportunidades en la Electrólisis del Agua de Mar ___ 81

3.3. Detalles Sobre Las Herramientas Y Tecnologías Empleadas en este proyecto (Modelos Computacionales, Pruebas En Laboratorio, Entre Otros). 83
3.3.1. Metodología empleada en este proyecto 84
3.3.2. Método de Electrólisis Directa de Agua de Mar Evitando la Corrosión 90

Adaptación A Las Condiciones Locales De Cartagena 94

4.1. Análisis De Los Desafíos Específicos Que Enfrenta Colombia (Climáticos, Económicos, Sociales). 94
4.1.1. Visión General sobre el Crecimiento y las Oportunidades de la Economía del H_2 en Colombia. 95
4.1.2. Generación de H_2 mediante Electrólisis. 98

4.2. Propuesta De Adaptaciones O Ajustes Tecnológicos Necesarios Para Implementar Las Innovaciones En Cartagena. 100
4.2.1. Membranas de PTFE para la Electrólisis Directa. 101
4.2.2. Electrolito Autohumectante (SDE). 101
4.2.3. Integración con Energías Renovables 102
4.2.4. Retos y Oportunidades en Cartagena 104

Resultados 105

5.1. Particularidades de la Electrólisis de Agua Marina 105
5.1.1. Evaluación Preliminar de la Viabilidad del Agua Marina de Cartagena para Procesos de Electrólisis 107

5.2. Análisis Inicial y Caracterización Preliminar del Agua de Playa 113
5.2.1. Hallazgos del Seguimiento Ambiental 115

5.3. Catalizadores utilizados en el proceso de electrólisis sin membrana de PTFE 117

5.4. Electrólisis Directa de Agua de Mar para la Producción de Hidrógeno 128
5.4.1. Migración de Agua 128
5.4.1. Eficiencia Faradaica 131

5.5. Análisis del Consumo Energético por Unidad de Hidrógeno Producido bajo Diferentes Condiciones Operativas 133

Conclusiones 135

Recomendaciones 136

Anexos 138

Bibliografía 140

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Métodos destacados y usos de la generación de hidrógeno. *14*
Figura 2. Progreso de generaciones de electrólisis del agua. *19*
Figura 3. Esquema de la electrólisis en medio alcalino. *22*
Figura 4. Avances en la electrólisis en medio alcalino. *24*
Figura 5. Estudio de eficiencia en la electrólisis alcalina. *25*
Figura 6. Proceso de electrólisis utilizando membranas de intercambio aniónico (AEM). *28*
Figura 7. Desarrollo de electrodos para la electrólisis AEM. *30*
Figura 8. Evaluación de materiales catalíticos para la evolución de hidrógeno (HER) en AEM. *31*
Figura 9 Diseño del sistema MEA. *36*
Figura 10. Modificación de la superficie de membranas Nafion™ para optimizar la eficiencia catalítica. *38*
Figura 11. Consumo de energía en el proceso de electrólisis con membranas modificadas. *39*
Figura 12. ..... *42*
Figura 13. Esquema del sistema de separación con corriente de barrido, permeado y retenida. *43*
Figura 14. Esquema de simulación de redes neuronales. *44*
Figura 15. Comparativa de la eficiencia entre reactor de membrana y reactor tradicional. *45*
Figura 16. Modelo computacional de un catalizador de átomo único (SAC) para la producción de hidrógeno. *49*
Figura 17. Estudio de la oxidación electrolítica en agua salina con la influencia de pH. *51*
Figura 18. Evaluación de materiales catalíticos en la reacción de evolución de oxígeno (OER) en agua marina. *54*
Figura 19. Desempeño de catalizadores para la reacción de evolución de hidrógeno (HER) en sistemas de electrólisis de agua marina. *55*
Figura 20. Visión general de la estrategia adoptada para analizar alternativas de agua (H_2O) destinadas a la generación de H_2 mediante el proceso de electrólisis del H_2O. *65*
Figura 21. Etapa de recolección de agua de una fuente prometedora, con las medidas de procesamiento requeridas. *74*
Figura 22. Evaluación preliminar de la viabilidad del agua marina de Cartagena para procesos de electrólisis. *76*
Figura 23. Estudio comparativo de la eficiencia de diferentes electrodos en condiciones marina. *80*
Figura 24. Diagrama ilustrativo de un sistema electrolítico de soporte (SES) estándar y explicación del mecanismo de migración, que se basa en la transformación de las fases líquido-gas-líquido durante el proceso de purificación del agua y la fuerza que impulsa su movimiento. *89*
Figura 25. Análisis de la eficiencia de un electrolizador en condiciones locales de Cartagena. *97*
Figura 26. Áreas del gobierno colombiano. *99*
Figura 27. Energías Renovables en Cartagena, Colombia. *103*
Figura 28. Recolección de muestras. *114*
Figura 29. Síntesis del catalizador Mo_5N_6. ..... *121*
Figura 30. Estudio de la estabilidad de catalizadores en la electrólisis de agua marina. *122*



ABREVIACIONES

Abreviación	Significado
H_2	Hidrógeno
H_2O	Agua
OER	Evolución de oxígeno (Oxygen Evolution Reaction)
HER	Reacción de evolución de hidrógeno (Hydrogen Evolution Reaction)
PEMWE	Electrólisis de Membranas de Intercambio de Protones (Proton Exchange Membrane Water Electrolysis)
AEMWE	Electrólisis de Membranas de Intercambio Aniónico (Anion Exchange Membrane Water Electrolysis)
PTFE	Politetrafluoroetileno (PolyTetraFluoroEthylene)
SAC	Catalizadores de Átomo Único (Single-Atom Catalysts)
CO_2	Dióxido de carbono
NiFe	Níquel-Hierro (Nickel-Iron)
MOF	Marco Organometálico (Metal-Organic Framework)
GDL	Láminas de Difusión de Gas (Gas Diffusion Layer)
KOH	Hidróxido de potasio (Potassium Hydroxide)
NaOH	Hidróxido de sodio (Sodium Hydroxide)



Resumen Ejecutivo

El mayor dinamismo en la vida de las personas ha provocado un alarmante incremento en el consumo de energía a nivel global. Como los combustibles fósiles continúan siendo la principal fuente de producción de energía, una industria que se encuentra directamente vinculada a la generación de desechos perjudiciales, causando daño ecológico y alteraciones climáticas. El hidrógeno verde se perfila como un componente esencial con capacidad de reemplazar a los combustibles fósiles como fuente de energía a nivel mundial, siempre y cuando se logren crear métodos confiables para producirlo sin emisiones de carbono. En la actualidad, el hidrógeno se ve como una opción prometedora para transportar energía de forma ecológica en los próximos años, dado que al arder en el aire no emite sustancias contaminantes ni gases de efecto invernadero, además de contar con una alta capacidad energética. En los últimos tiempos, se ha dedicado mucha atención a la generación de hidrógeno a través de la división del agua mediante fotocatálisis y electrólisis. Ambas tecnologías se muestran tentadoras por la oportunidad de operar en entornos suaves, sin generar sustancias dañinas y aprovechando la energía solar sostenible.

En este informe se describen los principios básicos de la generación de hidrógeno mediante una técnica clave: la **electrólisis**, un proceso electroquímico que ha ganado protagonismo por su capacidad de producir hidrógeno verde de manera eficiente utilizando fuentes de energía renovable. En particular, la electrólisis ofrece una ventaja significativa, ya



que permite la descomposición del agua mediante la aplicación de corriente eléctrica, lo que facilita una producción de hidrógeno limpia y controlada.

Se presentan diversos dispositivos diseñados para lograr la generación de hidrógeno puro, destacando tanto los sistemas de membrana como catalizadores avanzados para llevar a cabo el proceso de electrólisis. Estos últimos permiten una mayor flexibilidad en su adaptación a fuentes de energía renovable, como la solar o eólica, que pueden aprovecharse especialmente en las costas de Cartagena. El entorno costero de la región ofrece un escenario óptimo para experimentar con dicho método, abriendo la puerta a una posible combinación entre la fotocatálisis y la electrólisis para maximizar la producción de hidrógeno sostenible.

Aunque aún se requieren esfuerzos para optimizar el rendimiento del proceso, la electrólisis, en particular, ha demostrado ser una solución prometedora y escalable para la producción de hidrógeno verde. Este informe incluye un análisis crítico de estas tecnologías emergentes, los resultados de las pruebas y estudios realizados, y su potencial para mejorar la eficiencia y sostenibilidad del proceso de producción de hidrógeno verde en distintas partes del mundo y como dichas tecnologías pueden adaptarse a las condiciones locales (Cartagena) de manera rentable y ambientalmente sostenible.



Introducción

La humanidad se encuentra en un punto crucial en su relación con la energía. Durante más de un siglo, los combustibles fósiles han sido la columna vertebral del desarrollo industrial y económico a nivel global. Sin embargo, el costo ambiental de esta dependencia es insostenible, ya que las emisiones de gases de efecto invernadero están impulsando cambios climáticos peligrosos y alteraciones en los ecosistemas. Ante este panorama, la búsqueda de soluciones energéticas limpias y sostenibles es más urgente que nunca. Bajo este escenario, el hidrógeno (H_2) verde se ha consolidado como una de las opciones más prometedoras para reducir la huella de carbono en sectores claves, como la manufactura y transporte, donde las tecnologías actuales no son suficientes para reducir las emisiones a niveles aceptables.

El H_2, a diferencia de los combustibles tradicionales, es un vector energético que, al ser quemado, solo produce agua como subproducto. No obstante, su potencial como fuente de energía limpia depende completamente del método de producción. Actualmente, la mayor parte a nivel mundial se produce principalmente de fuentes de combustibles fósiles mediante procesos que producen emisiones significativas de CO_2. Por lo tanto, para que el hidrógeno sea verdaderamente verde, debe producirse mediante electrólisis del agua mediante el uso de fuentes de energía limpia, como solar y eólica. Este proceso separa las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno mediante una corriente eléctrica, sin emitir gases contaminantes.



Cartagena, con su ubicación costera y acceso a recursos renovables abundantes como la energía solar y eólica, se presenta como un lugar ideal para la obtención de H_2 verde. La región tiene el potencial de liderar la transición energética en Colombia, aprovechando su entorno geográfico privilegiado para implementar innovaciones tecnológicas avanzadas en la producción de H_2 a partir de agua de mar. No obstante, esta visión enfrenta importantes retos tecnológicos, particularmente en lo que respecta a la eficiencia y durabilidad de los sistemas de electrólisis en condiciones reales. El agua marina, aunque es un recurso prácticamente inagotable, presenta complicaciones técnicas significativas debido a la presencia de impurezas como sales, minerales y microorganismos, que pueden degradar los materiales utilizados en los electrolizadores y disminuir la eficiencia del proceso.

En los últimos años, el desarrollo de nuevos catalizadores y membranas para la electrólisis ha avanzado considerablemente, con innovaciones que mejoran la resistencia a la corrosión, aumentan la eficiencia energética y permiten una mayor adaptación a fuentes de energía intermitentes como la solar o eólica. Estos avances son clave para que la electrólisis del agua de mar sea una solución viable a gran escala. Entre las tecnologías más prometedoras se encuentran los sistemas de membranas de intercambio iónico y catalizadores que no dependen de metales preciosos, lo que podría reducir significativamente los costos y aumentar la sostenibilidad del proceso.



El objetivo de este informe es analizar en detalle las innovaciones tecnológicas más recientes en catalizadores y membranas, con un enfoque en su aplicación a la electrólisis de agua de mar. Se discutirá cómo estos avances pueden adaptarse a las condiciones específicas de Cartagena, una ciudad con un alto potencial para convertirse en un centro de producción de H_2 verde a nivel regional. Además, se presentarán propuestas de ajustes y adaptaciones tecnológicas necesarias para implementar de manera efectiva estas innovaciones en el contexto local, considerando los desafíos ambientales, económicos y sociales que enfrenta la región.

Este informe también examina el papel de Cartagena en el panorama energético global y su capacidad para liderar iniciativas que integren energías renovables en la producción de hidrógeno. La electrólisis de agua de mar, con los ajustes tecnológicos adecuados, podría no solo satisfacer la creciente demanda energética de manera limpia, sino también posicionar a Colombia como un jugador clave en el desarrollo de tecnologías verdes. La región tiene la oportunidad de capitalizar sus ventajas geográficas y su acceso a energías renovables para transformar la producción de hidrógeno en una fuente de ingresos, desarrollo y sostenibilidad a largo plazo.

Con este informe, se busca proporcionar una visión integral de las innovaciones más relevantes en el campo de la electrólisis del agua de mar y su potencial para revolucionar la industria energética de Cartagena y de Colombia en general. Este análisis pretende ser una



hoja de ruta para la implementación de tecnologías avanzadas en el contexto local, sentando las bases para un futuro donde el H_2 verde no solo sea una realidad, sino un motor de cambio hacia un mundo más limpio y sostenible.



Marco Teórico

2.1. Obtención De Hidrógeno Verde.

2.1.1. Generación De Hidrógeno

El hidrógeno puede ser generado a partir de una variedad de recursos, tanto renovables como no renovables, lo que resulta en una producción anual de aproximadamente 87 millones de toneladas (Dawood et al., 2020; Milani et al., n.d.). No obstante, desde el año 2020, la mayoría del hidrógeno (95%) fue generado utilizando fuentes fósiles no renovables, mediante principalmente la reformación con vapor de metano, lo que ha generado unas 830 millones de toneladas de CO_2 al año. El porcentaje restante de hidrógeno se obtiene de fuentes renovables, como la electrólisis del agua (Mosca et al., 2019; pidjoe, n.d.). La **Figura 1** muestra los procedimientos más relevantes para generar hidrógeno y sus posibles usos.



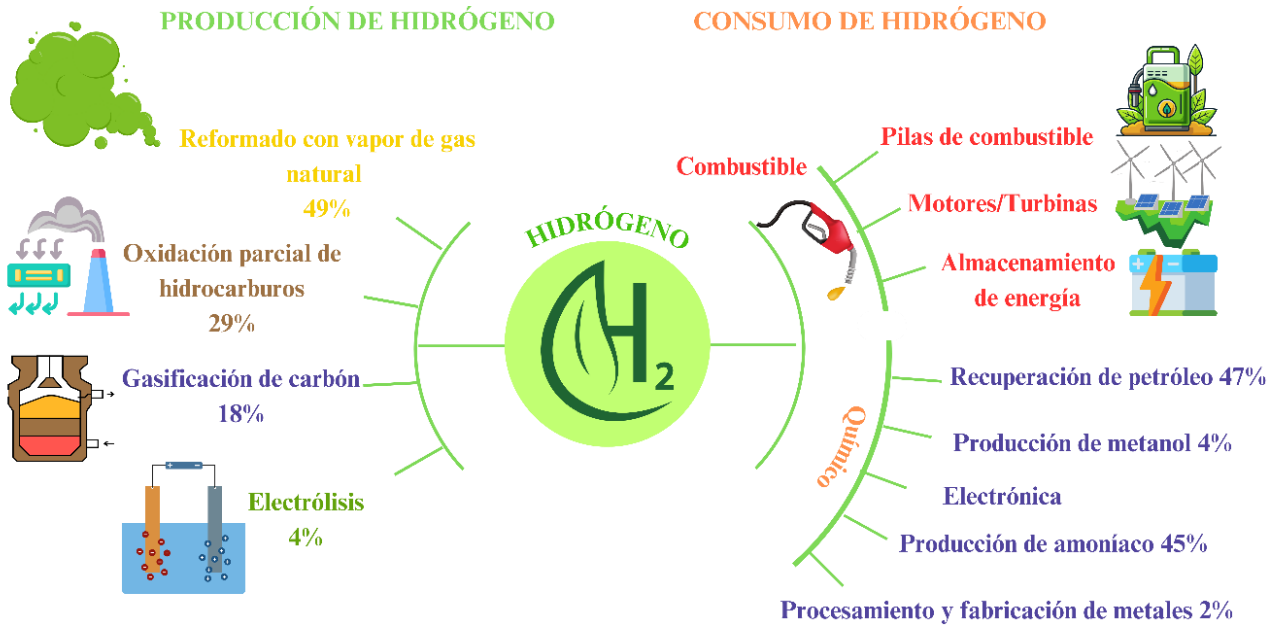


Figura 1. Métodos destacados y usos de la generación de hidrógeno.

El hidrógeno se categoriza en una variedad de matices cromáticos, como azul, gris, marrón, negro y verde, dependiendo de su método de generación, origen de energía y consecuencias ambientales (Observar la Tabla 1) (Ajanovic et al., n.d.; Noussan et al., 2020).

Tabla 1. Los matices cromáticos del hidrógeno, junto con su tecnología, gastos y emisiones de CO_2.

Tono del hidrógeno		Tecnología	Materia Prima	Productos formados	Gastos	Emisiones generadas de CO_2
Azul		Reforma y captura de carbono	Gas natural	H_2+CO_2 (Capturado 85-95%)	1 —2.9	Bajo
Gris		Reformado	Gas natural	H_2+CO_2 (Liberado)	1.2 —2.1	Medio
Marrón		Gasificación	Lignina	H_2+CO_2	1.2 —2.1	Alto



Negro		Gasificación	Carbón	H_2+CO_2	1.2 —2.1	Alto
Verde		Electrólisis	Agua	H_2+O_2	3.6 —5.8	Mínimo

El hidrógeno azul se genera mediante la reformación con vapor del gas natural. En esta etapa, el gas natural (GN) se descompone en hidrógeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2). El CO_2 resultante se retiene en un porcentaje del 85% al 95% y se guarda en el subsuelo a través de métodos tecnológicos de captura y confinamiento de carbono, aunque una parte del CO_2 producido no puede ser retenida. Además, los efectos que el almacenamiento puede tener en el futuro son desconocidos y las filtraciones aún podrían causar daños al medio ambiente y al clima (Hermesmann et al., n.d.; Navas-Anguita et al., 2021). El hidrógeno gris se obtiene de recursos energéticos no sostenibles, como el GN o la hulla, a través de técnicas de reformado con vapor o reformado autógeno. Este procedimiento guarda similitudes con el hidrógeno azul; sin embargo, en lugar de capturar el CO_2 generado, este se emite directamente al aire (Nikolaidis et al., n.d.). En la actualidad, el hidrógeno marrón es el tipo más empleado y se obtiene a partir de recursos abundantes en hidrocarburos, como la lignina o el metano, a través del proceso de gasificación. Sin embargo, en consecuencia, cada tonelada de hidrógeno oscuro emite aproximadamente entre 10 y 12 toneladas de CO_2 liberadas al aire. Durante el procedimiento de gasificación del carbón, se produce gas de síntesis desde el gasificador, del cual es posible extraer el hidrógeno de los otros gases mediante absorbentes o membranas especializadas. Los gases remanentes pueden ser emitidos a la atmósfera, generando así hidrógeno negro (IEA: The Future of Hydrogen -



Google Académico, n.d.; IRENA, 2021). El H_2 verde se obtiene a partir de la electrólisis del agua, un proceso que implica la separación de sus componentes, H_2 y O_2, por medio del suministro de electricidad. Este método garantiza la producción de hidrógeno sin generar liberación de CO_2, provocando que sea una opción amigable con el entorno (Carmo et al., n.d.).

En el camino hacia la eliminación de carbono a nivel mundial, en la actualidad se ve con mayor frecuencia la producción de hidrógeno ecológico a partir de fuentes de energía renovable como una alternativa para disminuir las emisiones de gases que provocan el efecto invernadero y la contaminación del ambiente medio (Burton et al., n.d.; Yue et al., n.d.). De esta manera, se observa un creciente entusiasmo por lograr que la fabricación y aplicación de este hidrógeno ecológico sean más adaptables y flexibles. La electrólisis del agua se presenta como una tecnología esencial que permite descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno utilizando energía sostenible, como la solar o la eólica (Burton et al., n.d.; energy & 2012, n.d.) a. La energía solar y la energía del viento son recursos renovables ideales y óptimos para generar hidrógeno mediante la electrólisis del agua, gracias a su extensa disponibilidad energética (Wang et al., n.d.). La unión de energía sostenible y electrólisis del agua resulta especialmente beneficiosa, ya que el exceso de energía eléctrica puede ser almacenado de manera química en hidrógeno para compensar la diferencia entre la necesidad y generación de energía (Brauns et al., n.d.). Asimismo, el hidrógeno y el oxígeno generados pueden ser empleados de forma inmediata en el ámbito del transporte y la industria como fuentes



principales de energía. El hidrógeno no solo sirve como una fuente principal de energía, sino que además actúa como un transportador energético que puede ser utilizado de forma directa en automóviles equipados con pilas de combustible y en la industria. Asimismo, el hidrógeno puede ser empleado como insumo en las ramas química y petroquímica para la fabricación de amoníaco y carburantes artificiales(Jovan et al., n.d.; Kumar, Technologies, et al., n.d.-a; Shiva Kumar et al., 2019). Además de eso, una ventaja adicional del hidrógeno como transportador de energía radica en la superior eficiencia de los mecanismos de almacenamiento de hidrógeno en comparación con las baterías.

2.2. Electrólisis Del Agua

La electrólisis del agua se destaca como una técnica de separación electroquímica del agua que posibilita la generación de hidrógeno ecológico mediante el uso de energía eléctrica, lo cual constituye una tecnología sin emisiones. La ecuación que representa la reacción fundamental de la electrólisis del agua es la siguiente:

$$1H_2O + electricidad\ (237.2\ kJ\ mol^{-1}) + calor\ (48.6\ kJ\ mol^{-1}) \rightarrow H_2 + {}^{1}/_{2}\ O_2 \qquad (1)$$

La reacción previa (Ec. (1)) demanda un voltaje teórico termodinámico de celda de 1.23 V para descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno a condiciones de temperatura ambiental. No obstante, en la práctica, se necesita un voltaje de celda de 1.48 V para lograr una separación eficaz del agua. Es imprescindible contar con un voltaje adicional que permita



vencer tanto la resistencia cinética como la resistencia óhmica presentes en el electrolito y los elementos de la celda del electrolizador (Kumar, Energy, et al., n.d.; B. Lee et al., n.d.; Lim et al., n.d.).

Durante los últimos doscientos años, la técnica de la electrólisis del agua se ha destacado como un método ampliamente reconocido en la fabricación de hidrógeno ecológico. No obstante, a escala global, únicamente el 4 % del hidrógeno (equivalente a 65 millones de toneladas) se genera mediante el proceso de electrólisis del agua debido a dificultades de índole económica, y la mayor parte de esta sustancia se fabrica como un derivado de la industria cloroalcalina (Hall et al., n.d.; Yodwong et al., n.d.; F. Yu et al., n.d.). A lo largo de su continuo crecimiento y uso en aplicaciones industriales desde el siglo XVIII, las tecnologías de electrólisis del agua han sido influenciadas por diversas tendencias, lo que ha dado lugar a una división en aproximadamente cinco generaciones (Shiva Kumar & Lim, 2022). La **Figura 2** muestra las diferentes generaciones de electrólisis del agua, junto con sus respectivas dificultades, avances técnicos y relevancia.

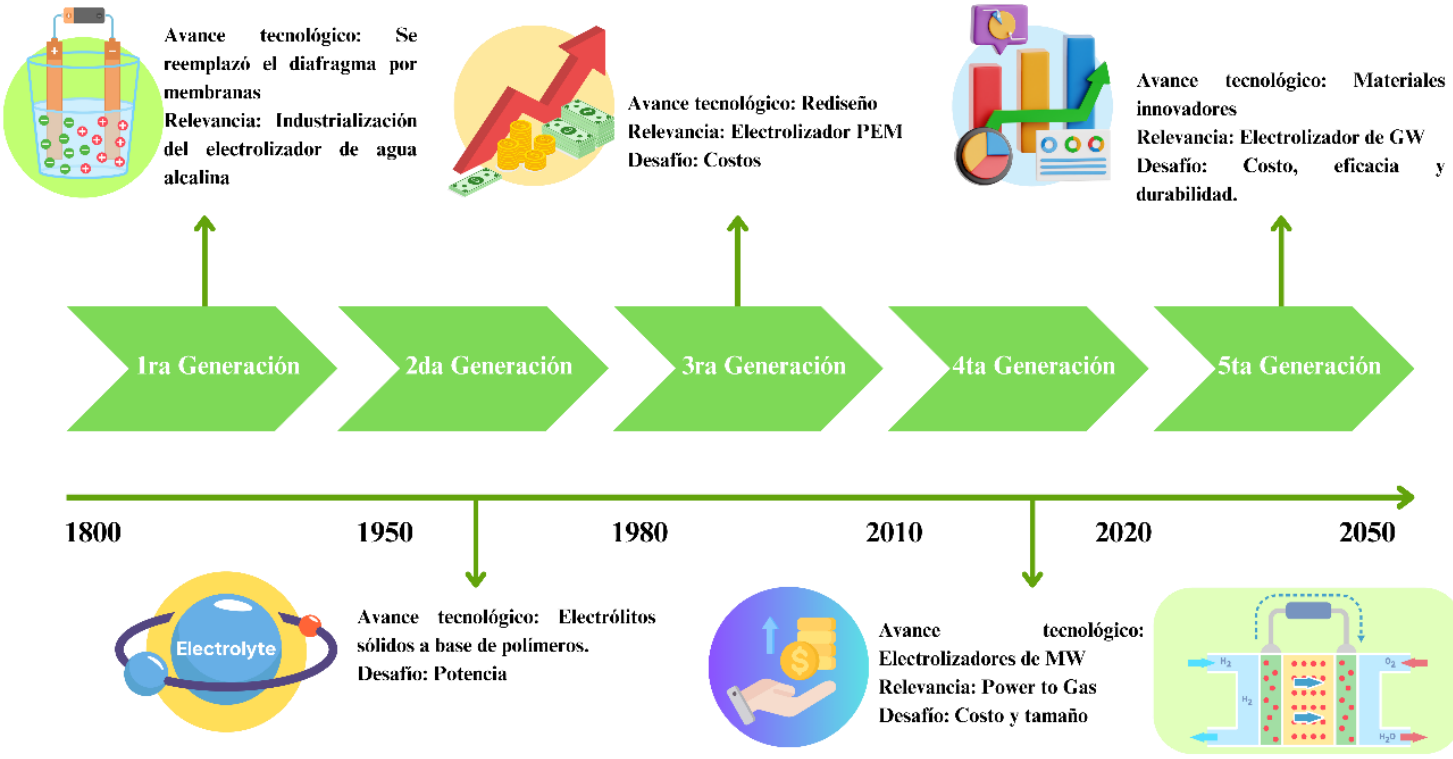


Figura 2. Progreso de generaciones de electrólisis del agua.

Durante el avance de estas innovaciones, se introdujeron cuatro tipos de electrólisis del agua, diferenciadas por el medio electrolítico que emplean, sus parámetros de funcionamiento y los iones involucrados (OH^-, H^+, O^{2-}). Estas comprenden: **(i)** Electrólisis alcalina, **(ii)** Electrólisis con membrana AEM, **(iii)** Electrólisis con membrana PEM y **(iv)** Electrólisis de óxido sólido. A pesar de las variaciones, los fundamentos de operación son equivalentes en todos los métodos (Kumar, Technologies, et al., n.d.-b).



2.3. Explicación Técnica De Los Principios De Funcionamiento De Los Tipos De Electrólisis

2.3.1. Electrólisis En Medio Alcalino

El método de electrólisis en soluciones alcalinas ha logrado consolidarse como una opción desarrollada y efectiva en el ámbito industrial para la obtención de hidrógeno, alcanzando niveles de producción significativos, que pueden llegar a ser de gran magnitud, en proyectos comerciales de gran escala alrededor del mundo (Kuckshinrichs et al., 2017). El principio de la electrólisis en medio alcalino fue propuesto inicialmente por Troostwijk y Diemann en 1789. A lo largo del tiempo, y tras diversos avances, en 1939 se inauguró la primera instalación industrial de electrolizadores de agua alcalina de gran magnitud, con la capacidad de generar 10.000 N m^3 de hidrógeno por hora (Santos et al., 2013). Hacia finales del siglo XIX, se implementaron y funcionaron satisfactoriamente más de 400 sistemas de electrolizadores alcalinos en el ámbito industrial (Grigoriev et al., 2020). No obstante, este tipo de electrolizador opera a temperaturas más moderadas, que varían entre 30 y 80 °C, empleando una solución concentrada de álcalis, como 5M KOH o NaOH. Asimismo, en estos dispositivos se emplean ánodos y cátodos de acero inoxidable revestidos con níquel (Ni) y membranas de amianto o ZrO_2 como elementos divisores (Shiva Kumar et al., 2018). El ion hidroxilo (OH^-) es el responsable de transportar la carga iónica, mientras que el KOH/NaOH y el agua pasan a través de la estructura porosa del separador, permitiendo que se lleve a cabo



la reacción electroquímica (Shiva Kumar et al., 2017; Lee et al., 2021ª. La electrólisis alcalina se considera una configuración óptima para aplicaciones de gran envergadura. Actualmente, el costo de capital para esta tecnología se encuentra entre 500 y 1000 dólares por kilovatio, y el tiempo de funcionamiento del sistema alcanza las 90.000 horas (Bertuccioli et al., 2014a; Bertuccioli et al., 2014b; Schmidt et al., 2017). No obstante, el mayor reto que presenta la electrólisis alcalina son las densidades de corriente restringidas (0.1-0.5 A/cm²), a causa de la baja concentración y limitada movilidad de los iones OH^-, además del uso de electrolitos agresivos como el KOH (IRENA, 2020a). La elevada sensibilidad del KOH al CO_2 del aire ambiente, que conduce a la formación de K_2CO_3, disminuye el número de iones hidroxilo y, por tanto, la conductividad iónica. A su vez, el K_2CO_3 bloquea los orificios de la barrera de difusión de gases del ánodo, lo que afecta negativamente la transferencia de iones a través del separador y reduce la eficiencia en la generación de hidrógeno. Además de lo anterior, la electrólisis alcalina genera gases (hidrógeno y oxígeno) con una pureza relativamente baja (99.9%), ya que el separador actual no bloquea completamente el paso de gases entre las semiceldas.



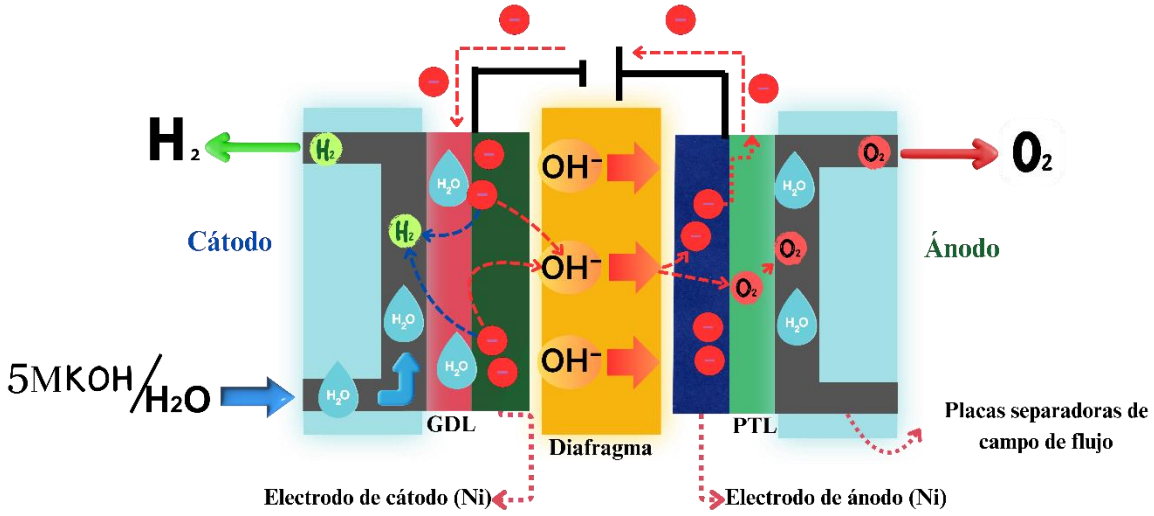


Figura 3. Esquema de la electrólisis en medio alcalino.

2.3.1.1. Estudio Y Avance De La Electrólisis En Medio Alcalino

La electrólisis del agua alcalina es una tecnología bien establecida para la producción de H_2 verde, pero enfrenta varios desafíos que limitan su eficiencia y viabilidad económica. En este contexto, se han llevado a cabo diversas investigaciones para abordar estos problemas y mejorar el rendimiento de los sistemas de electrólisis. Un área clave de investigación se centra en el desarrollo de nuevos materiales para los electrodos. Tradicionalmente, los electrodos utilizados en la electrólisis alcalina están basados en metales nobles, como el platino, que son costosos y limitan la escalabilidad de la tecnología. Investigadores como Liu et al. (2020) han explorado estructuras híbridas de MoS_2@$Ni_{0.96}S$, que actúan como



catalizadores bifuncionales en medios alcalinos. Estos nuevos materiales no solo son más económicos, sino que también han demostrado una actividad superior en las reacciones de evolución de hidrógeno (HER) y evolución de oxígeno (OER), lo que podría reducir significativamente el sobrepotencial requerido para estas reacciones y, por ende, mejorar la eficiencia general del proceso.

En su trabajo, Xu et al. creó un electrocatalizador dual de gran eficacia, basado en láminas de NiCoP obtenidas a partir de un esqueleto metalorgánico (MOF) en soluciones básicas. Este catalizador NiCoP mostró un sobretensión de 119 mV para HER y 315 mV para OER con una corriente de 100 mA/cm², superando la eficiencia de catalizadores comerciales como el 5% Pt/C y IrO_2. Además, mostró una gran estabilidad durante 30 horas de operación continua y logró un voltaje de celda de 1.94 V con una corriente de 1 A/cm² en un electrolizador básico. Su investigación abordó la necesidad de mejorar la conductividad y la estabilidad de los materiales de los electrodos, lo que es fundamental para aumentar la eficiencia del proceso de electrólisis. A través de la modificación de la composición y la estructura de los electrodos, lograron mejorar significativamente la actividad electrocatalítica.

La investigación de Jin et al. se centró en el desarrollo de nuevas estrategias para mejorar la eficiencia de la electrólisis del agua mediante el uso de materiales innovadores. En su estudio, exploraron el uso de catalizadores basados en materiales no nobles, lo que

representa un avance significativo en la búsqueda de alternativas más económicas a los catalizadores tradicionales basados en metales preciosos. En su estudio, desarrollaron un catalizador de nanointerfaz formado por Ni-Mo-O/Ni_4Mo@NC, utilizando carbono con nitrógeno dopado como soporte, a través de procesos de electrodeposición y calcinación. Este catalizador presentó una notable actividad electrocatalítica, alcanzando un sobrepotencial de inferior al de otros catalizadores basados en Ni-Mo-O. Además, los ensayos realizados en ambientes neutros también mostraron un sobrepotencial bajo, consolidándose como una alternativa eficiente y más asequible en comparación con los catalizadores de metales nobles.

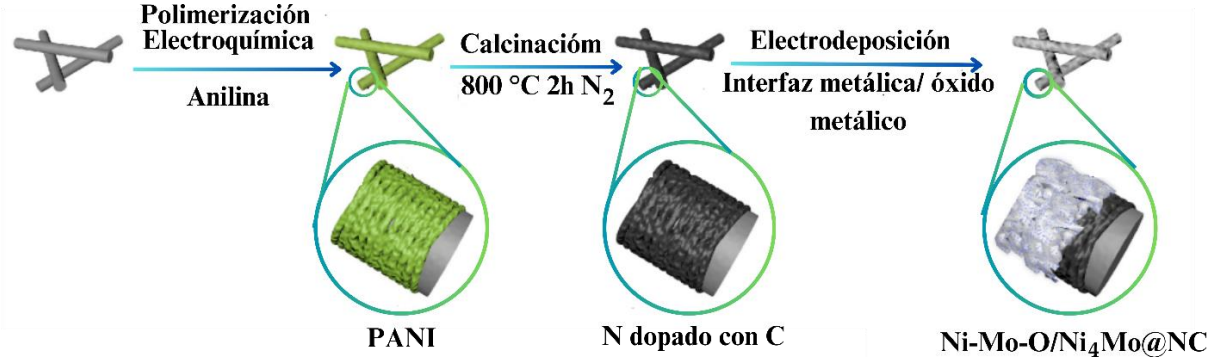


Figura 4. Avances en la electrólisis en medio alcalino.

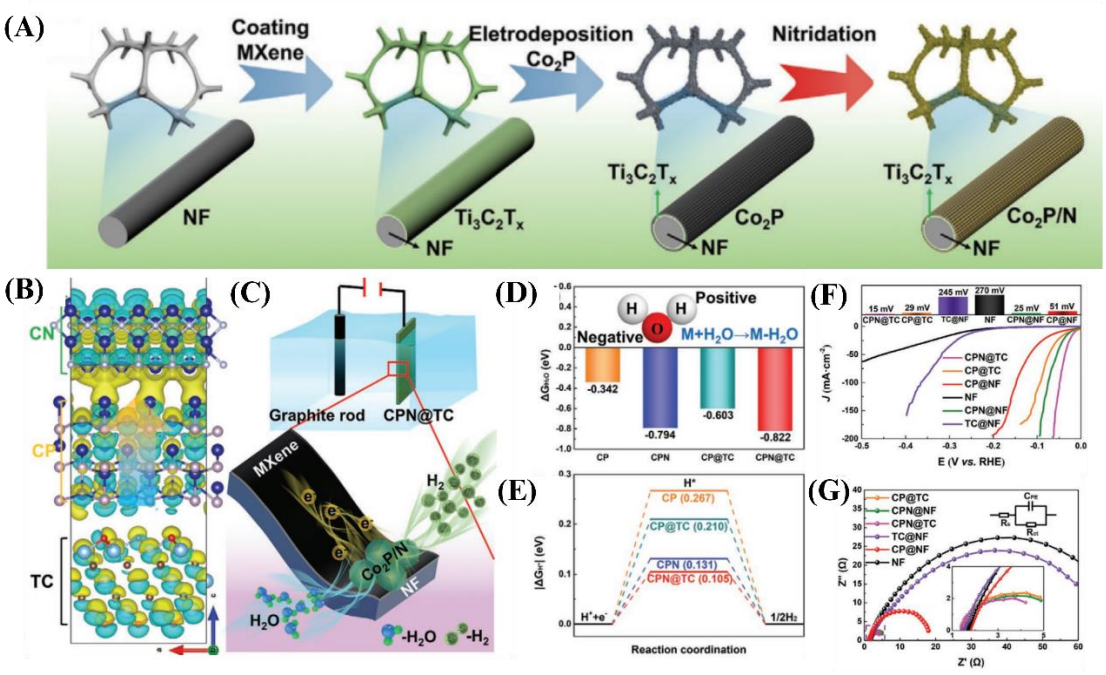


Figura 5. Estudio de eficiencia en la electrólisis alcalina.

Otro aspecto crítico que se ha investigado es la optimización de los separadores, también conocidos como diafragmas, que son componentes esenciales en las celdas de electrólisis. La investigación ha mostrado que la reducción del grosor de estos separadores puede disminuir la resistencia interna de la celda, lo que a su vez mejora la eficiencia. Actualmente, el grosor de los diafragmas es de aproximadamente 460 µm, y se sugiere que este grosor se reduzca a 50 µm. Esta reducción podría aumentar la eficiencia de la celda del 53% al 75% a una densidad de corriente de 1 A/cm², lo que representa un avance significativo en la tecnología.



La densidad de corriente es otro factor crítico que afecta el rendimiento de la electrólisis alcalina. Actualmente, la densidad de corriente en estos sistemas es relativamente baja, lo que limita la producción de hidrógeno. Investigaciones recientes han identificado que es necesario aumentar la densidad de corriente a niveles de 2-3 A/cm². Para lograr esto, se propone el uso de electrodos con alta superficie específica y la implementación de separadores más delgados, lo que podría facilitar una mayor interacción entre los reactivos y mejorar la eficiencia del proceso. Además, la intermezcla de gases generados durante la electrólisis es un problema que afecta la pureza del hidrógeno producido. Este fenómeno, conocido como crossover de gases, ocurre principalmente en soluciones concentradas de KOH, donde los gases generados pueden disolverse en el electrolito y mezclarse. Para mitigar este problema, se sugiere reducir el grosor de los separadores y mejorar la interfaz entre las capas de catalizador y los materiales de transporte poroso. Estas mejoras no solo ayudarían a mantener la pureza del hidrógeno, sino que también optimizarían el rendimiento general del sistema.

Finalmente, la integración de la electrólisis del agua alcalina con fuentes de energía renovable, como la solar y la eólica, es un área de investigación prometedora. Esta integración no solo podría reducir los costos de capital asociados con la electrólisis, sino que también haría que el proceso sea más sostenible y alineado con los objetivos de descarbonización global. La combinación de tecnologías renovables con sistemas de



electrólisis podría facilitar la producción de hidrógeno verde a gran escala, contribuyendo así a la transición hacia un futuro energético más sostenible.

2.3.2. División Del Agua Mediante Una Membrana De Transporte Aniónico (AEM)

El método de electrólisis de agua con membrana de intercambio aniónico (AEM) es un ámbito en crecimiento para la obtención de H_2 limpio. En los años recientes, diversas entidades e institutos de investigación han promovido el avance de la electrólisis AEM debido a su precio reducido y mayor desempeño en contraste con otras formas tradicionales de electrólisis. El primer trabajo científico sobre AEMWE fue presentado por We y Scott en 2011, y desde entonces muchos expertos han colaborado en su perfeccionamiento (Wang et al., 2020a; Wang et al., 2020b). La electrólisis AEM muestra similitudes con la electrólisis alcalina tradicional (Miller et al., 2020), aunque la distinción principal es el reemplazo de los diafragmas de amianto por membranas de intercambio aniónico (como las de amonio cuaternario).

Este sistema presenta varias fortalezas, como el uso de catalizadores de metales de transición más accesibles en lugar de metales preciosos, y la utilización de agua purificada o disoluciones alcalinas de baja concentración (1 M KOH) en vez de disoluciones más concentradas (5 M KOH) (Henkensmeier et al., 2021). Sin embargo, pese a sus beneficios,

la electrólisis AEM todavía necesita mejoras en la estabilidad de la MEA y en el rendimiento de la celda, elementos fundamentales para su implementación a gran escala.

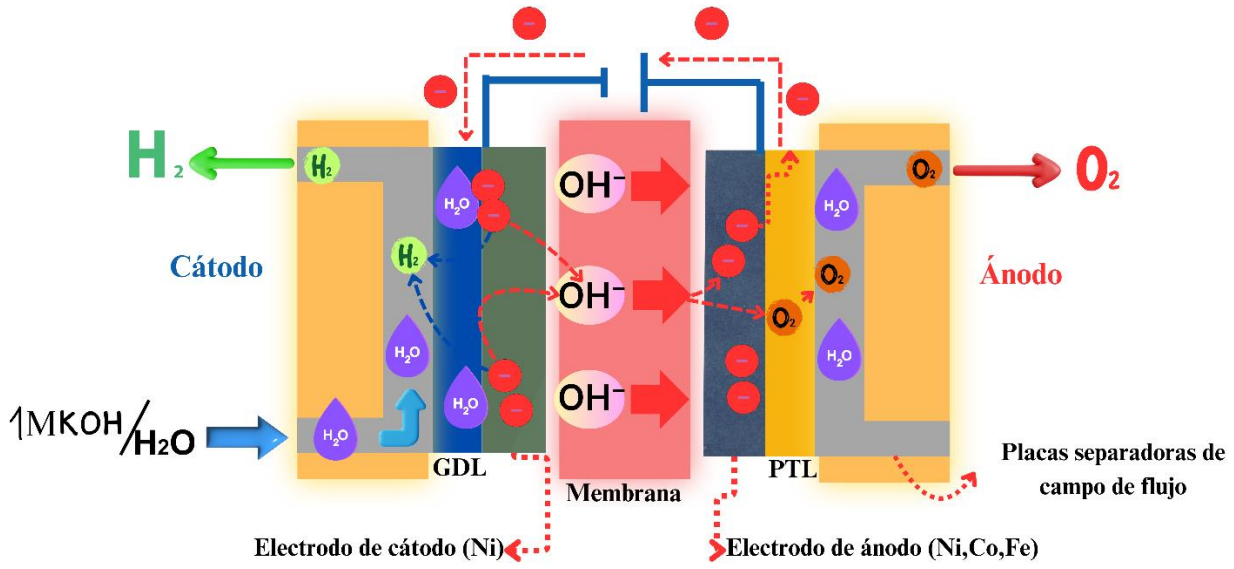


Figura 6. Proceso de electrólisis utilizando membranas de intercambio aniónico (AEM).

2.3.2.1. Estudio Y Avance De La Electrólisis Usando AEM

Thangavel et al. (2021) crearon un electrodo tridimensional para la generación de oxígeno a través de la incorporación electroquímica de NiFeOOH amorfo sobre papel de fibra de carbón activado (CFP), empleando un método de coelectrodeposición en un único proceso. Evaluaron su desempeño en un medio de KOH 1M. El electrodo 3D-a-NiFeOOH/N-CFP mostró un comportamiento electroquímico superior, con un voltaje extra de solo 170 mV a



una intensidad de corriente de 10 mA cm $^{-2}$, una menor inclinación de Tafel de 39 mV dec $^{-1}$ y una sobresaliente durabilidad en la solución de KOH 1M, como se ilustra en la Fig. 7.

La optimización observada se debe a las configuraciones tridimensionales innovadoras que ofrecen un mayor número de sitios activos y una potenciada conductividad eléctrica, lo que favorece la aceleración de la cinética de la reacción de evolución de oxígeno (OER) y las capacidades de transporte de masa. Por otro lado, la inclusión de hierro (Fe) resulta crucial en el aumento de la funcionalidad OER del electrodo 3D-a-NiFeOOH/N-CFP. Adicionalmente, la eficacia del electrodo 3D-a-NiFeOOH/N-CFP en la OER fue analizada en un electrolizador de agua AEM alcalino de celda individual, utilizando agua purificada, y se contrastó con electrodos disponibles en el mercado de IrO_2 bajo condiciones experimentales semejantes. Sorprendentemente, el electrodo 3D-a-NiFeOOH/N-CFP creado mostró un desempeño electroquímico sobresaliente frente a los electrodos de IrO_2 comerciales, logrando un voltaje de celda de 1.88 V en comparación con los 2.08 V de los electrodos comerciales de IrO_2, a una densidad de corriente de 1 A/cm², alcanzando una eficiencia energética del 80 % (Thangavel et al., 2021)

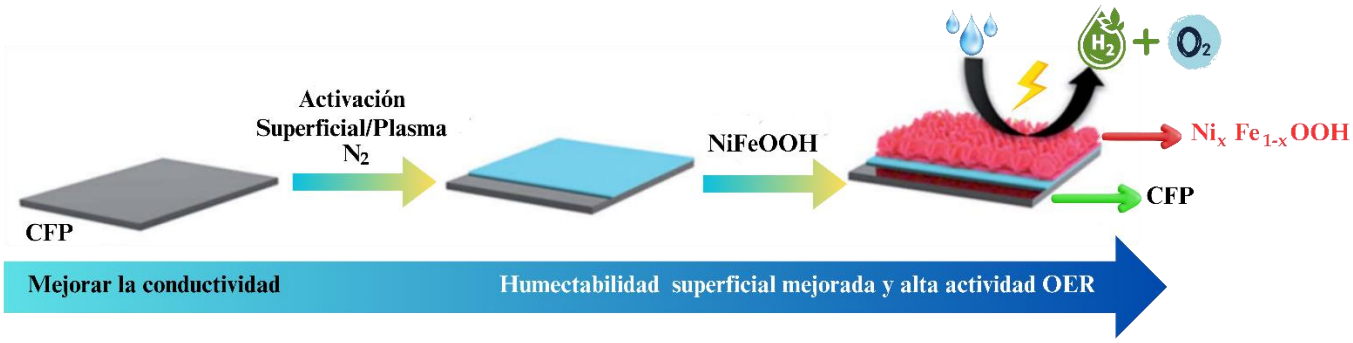


Figura 7. Desarrollo de electrodos para la electrólisis AEM.

Guo et al., 2021, reportaron un método sencillo y rápido para la síntesis de Cu-Co-P sobre un sustrato de papel de carbón (CP) empleando la técnica de electrodepósito (Figura 8). En una primera etapa, se ajustaron las variables de deposición de Co-P/CP y se analizaron para la reacción de evolución de hidrógeno (HER) en medio alcalino. Los hallazgos obtenidos indicaron una eficacia electrocatalítica adecuada, con un voltaje extra de 72 mV a una intensidad de corriente de 10 mA cm^{-2}. Posteriormente, alteraron las características superficiales, incluyendo la configuración electrónica, e incrementaron los sitios activos de Co-P mediante la adición de Cu para optimizar el desempeño electroquímico. El Cu-Co-P1200/CP ajustado mostró un funcionamiento notable, logrando un voltaje mínimo de 59 mV a una intensidad de corriente de 10 mA cm^{-2} y una pendiente de Tafel reducida de 38 mV dec^{-1}.

N. Chen et al., 2021 desarrollaron compuestos de intercambio aniónico fundamentados en poli(fluorenil-co-aril piperidinio) (PFAP), los cuales incluyen tanto un electrolito de membrana como un adhesivo con elevada capacidad de conducción iónica y notable resistencia en medios alcalinos. El electrolito creado, combinado con catalizadores metálicos del grupo del platino (PGM) como IrO_2 y Pt/C, estableció un hito en desempeño celular de 7.68 A/cm^2 a 2 V utilizando 1 M de KOH. Por otro

lado, los compuestos exentos de PGM, como Ni-Fe, lograron una destacada intensidad de corriente de 1.62 A/cm² a 2 V. Asimismo, tanto los catalizadores con PGM como los libres de PGM evidenciaron una durabilidad sobresaliente, operando por más de 1000 horas a una densidad de corriente constante de 0.5 A/cm² a 60 °C, sin presentar pérdida de voltaje.

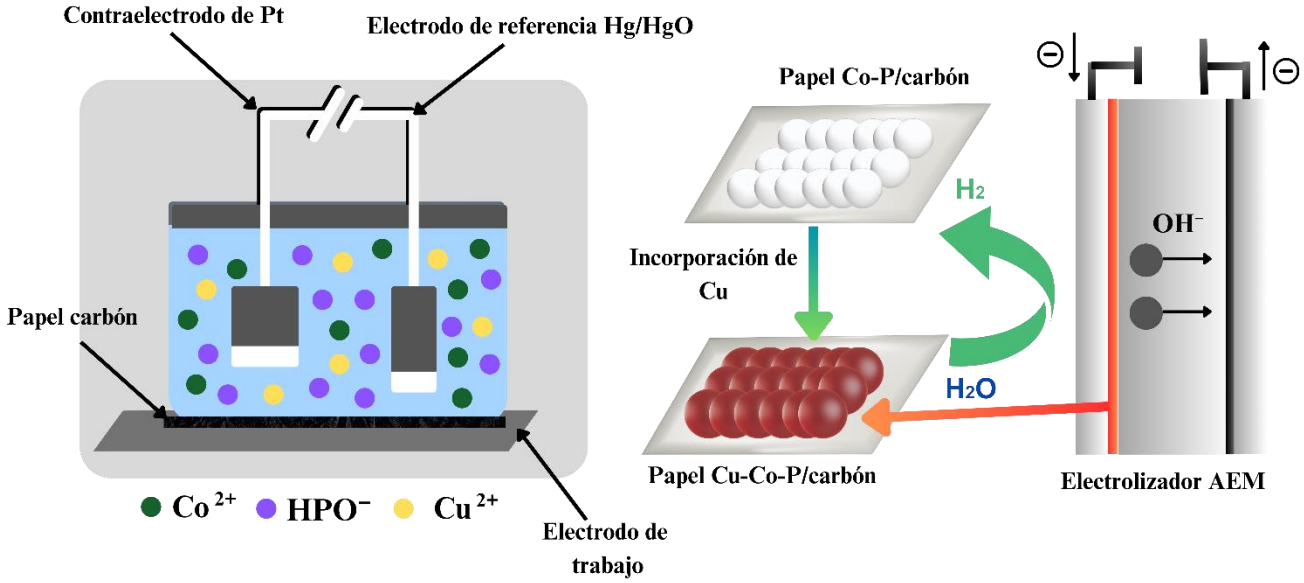


Figura 8. Evaluación de materiales catalíticos para la evolución de hidrógeno (HER) en AEM.

2.4. Reseña De La Literatura Sobre Las Innovaciones Tecnológicas Más Recientes En Este Campo.

2.4.1. Nuevos Progresos Y Miradas Hacia El Futuro En Cuanto A Catalizadores Utilizados En La Industria Para Generar Hidrógeno Verde En Entornos Alcalinos.



En la exploración de alcanzar cero emisiones de carbono, la electrólisis del agua ha captado el interés de muchos como una de las vías más alentadoras para aprovechar de forma eficaz recursos energéticos sostenibles como la eólica, la hidroeléctrica o la solar y transformarlas en hidrógeno de manera sostenible (Li et al., n.d.; J. Yu, 2021). No obstante, en el transcurso de la electrólisis del agua, la presencia de sobretensión resultará en una disipación de energía, y la eficacia de la reacción de liberación de hidrógeno (HER) está fuertemente influenciada por la selección del electrocatalizador (Wu, Xu, Zhang, Luo, Wang, Tang, Wang, & Huang, 2022). Así que, elegir un catalizador adecuado puede disminuir de manera efectiva el exceso de potencial, permitiendo una generación eficaz de hidrógeno (Xu et al., 2023).

Sin embargo, la elección de materiales, los fundamentos del diseño y los procesos catalíticos de los catalizadores son influenciados por diversos contextos catalíticos. Los catalizadores que llevan a cabo la electrólisis en entornos ácidos, neutros o alcalinos presentan distintas características dependiendo del tipo de electrolito en el que se encuentren. La corrosión intensa de metales comunes puede ser provocada por entornos ácidos, por lo tanto, se requiere el empleo de metales valiosos y escasos como el iridio y el platino para fabricar los electrodos, lo que resulta en elevados gastos y una fuerte acidez (Xu et al., 2023).

La durabilidad de los equipos PEM se ve significativamente disminuida por un entorno corrosivo, lo cual restringe su uso a nivel masivo y el progreso tecnológico de los electrocatalizadores en medios ácidos (Jin et al., 2020; Yeo et al., 2022). En cambio, al



realizar la electrólisis del agua en ambientes alcalinos, se amplía la gama de opciones de catalizadores a diversos materiales de metales de transición comunes en nuestro planeta. Sin embargo, estos suelen operar con menor eficacia y necesitan equipos de mayor tamaño, lo que resulta en mayores costos. Entre los beneficios que ofrecen los electrolizadores PEM se encuentran su habilidad para generar hidrógeno de la más alta calidad, su aptitud para operar en condiciones de alta presión y su rapidez para guardar el combustible de hidrógeno. En contraste con los electrolizadores alcalinos, las membranas de polímero sólido PEM poseen un gran potencial de reacción al servir como una magnífica barrera para reacciones redox y separación de gases. Esto otorga a los electrolizadores una mayor capacidad de conducción de protones y una resistencia al paso del hidrógeno (López-Fernández et al., 2022; Zakaria & Kamarudin, 2021). No obstante, el progreso en la creación de membranas de intercambio aniónico alcalino (AEM) representa un hito significativo en la evolución de los electrolizadores de entorno alcalino (Xu et al., 2023).

El innovador sistema electrolizador AEM portátil ha sido diseñado para combinar de manera óptima las ventajas del económico sistema electrolizador alcalino inicial, junto con la excepcional resistencia a la presión, la elevada pureza en la producción de hidrógeno, la sobresaliente eficiencia y la máxima seguridad característica del electrolizador PEM. Al mismo tiempo, no necesita necesariamente electrolitos líquidos altamente corrosivos; lo cual le ofrece ser una opción más segura y amigable con el medio ambiente. La utilización de membranas poliméricas más costosas, como las membranas elaboradas a partir de polímeros



cuaternarios, en lugar de las membranas costosas fabricadas con Nafion, posibilita un funcionamiento altamente eficaz en los sistemas de electrólisis de agua a pequeña escala (Khataee et al., 2022; Mayerhöfer et al., 2021; Wan et al., 2022). De esta manera, es factible producir electrolizadores AEM económicos, lo que impulsaría el avance en la potencialidad de fabricación de hidrógeno, la durabilidad incrementada y el rendimiento energético optimizado en sistemas fijos, portátiles y móviles de producción de energía (Cao et al., 2019; Cho et al., 2017). A pesar de ello, persisten retos en la creación de catalizadores eficaces para llevar a cabo la electrólisis del agua, ya que implica diversos procesos de reacción y la velocidad de separación del agua en el HER alcalino, así como la baja velocidad de transferencia de los cuatro electrones en la REA. En el presente, aún no se ha determinado de manera precisa el manejo de los sitios activos distintivos de los catalizadores. Es crucial entender a fondo el proceso de reacción de HER/OER y, posteriormente, desarrollar catalizadores electroquímicos eficientes para realizar la electrólisis del agua.

Ante las exigencias del avance de la industrialización, resulta fundamental la creación de electrocatalizadores que puedan ser producidos en grandes cantidades, operar de forma eficaz a largo plazo con una elevada intensidad de corriente y resistir condiciones demandantes en ambientes industriales, como la presión y la temperatura. Durante los últimos diez años, se han creado y concebido catalizadores de mayor eficacia. No obstante, la mayor parte de estos se suelen investigar en entornos de laboratorio (con densidades de corriente de 1 a 100 $mA \cdot cm^2$) en relación con la electrólisis del agua y la velocidad de



reacción catalítica de sustancias fundamentales. Únicamente un número reducido de catalizadores ha evidenciado su capacidad para gestionar densidades de corriente significativas en contextos industriales (Luo et al., 2022; Villagra & Millet, 2019; Wu, Xu, Zhang, Luo, Wang, Tang, Wang, Huang, et al., 2022; Zhang et al., 2021). No obstante, los catalizadores con bajas densidades de corriente a veces no logran abordar de manera efectiva las complicadas interacciones en la interfaz, el comportamiento de las burbujas, la resistencia eléctrica, la temperatura, la presión elevada y otros desafíos presentes en densidades de corriente altas (Xu et al., 2023).

No obstante, en tiempos recientes se ha observado un incremento en el estudio de la creación de catalizadores de agua destinados a la electrólisis industrial. Tenemos en cuenta que, son escasos los que se dedican a la elaboración de electrodos catalíticos para equipos de electrólisis en la industria, la creación de membranas y dispositivos, y otros aspectos relacionados con el desarrollo de baterías.

2.4.2. Últimos Desarrollos En Tecnología Catalíticas Y Sistemas De Membrana Para La Generación De H_2

2.4.2.1. Alteración De La Estructura De Una Membrana PEM Con El Fin De Potenciar La Generación De Hidrógeno Ecológico.

El componente de intercambio de membrana (MEA) resulta esencial en el funcionamiento de una celda PEM, siendo crucial en el proceso electroquímico que origina la separación del

agua en sus componentes de hidrógeno y oxígeno (Xing et al., 2019). La disposición común de un MEA incluye una membrana de intercambio de protones, una capa de catalizador, láminas de difusión de gas (GDL) en ambos lados y placas de ánodo y cátodo enfrentadas, tal como se ilustra en la Figura 9. El polímero de ácido sulfónico perfluorado es utilizado en la fabricación del PEM para facilitar la conducción eficaz de protones del ánodo al cátodo. Por lo general, la estructura catalítica se coloca de manera apropiada en medio de la membrana, lo que favorece el proceso de descomposición de las moléculas de agua. Las capas de difusión de gas hechas de tejido de carbono aseguran la separación de los gases generados, preservando su calidad.

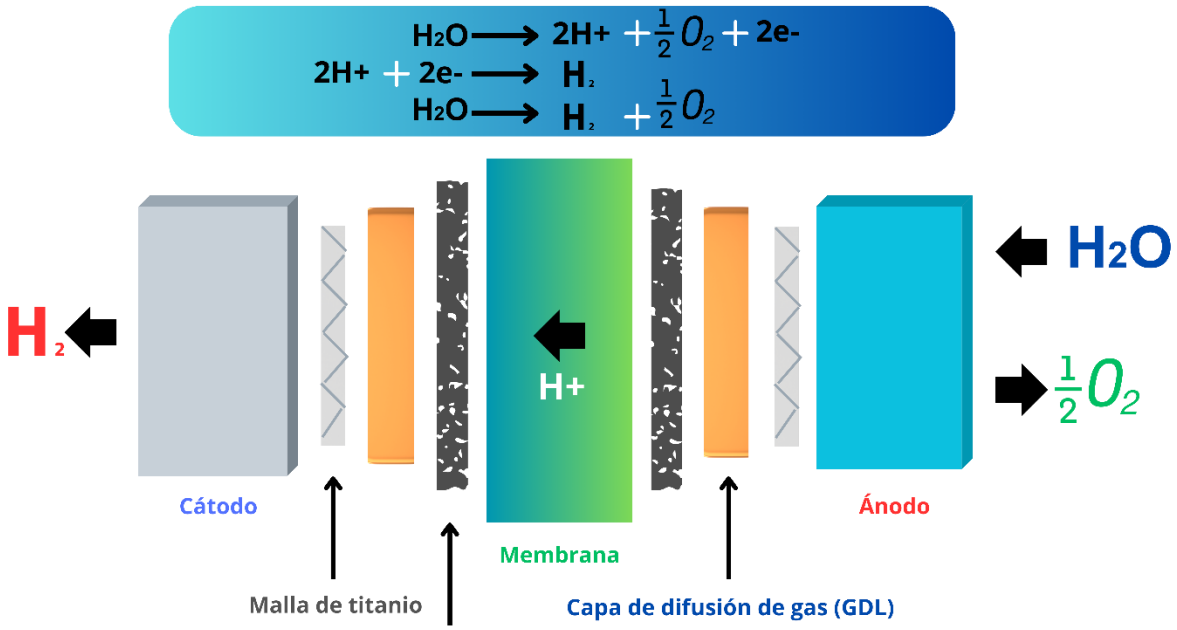


Figura 9. Diseño del sistema MEA.



La importancia del diseño y la selección de los materiales en las celdas PEM es crucial para garantizar su eficacia y resistencia a lo largo del tiempo. En investigaciones actuales, se ha puesto el foco en optimizar el diseño y los componentes de los MEA con el objetivo de aumentar la eficiencia global y disminuir los gastos asociados a la electrólisis PEM (Xing et al., 2019). Los progresos realizados han evidenciado su gran potencial para mejorar tanto la eficacia como la resistencia, lo que convierte a las células PEM en una opción más rentable y respetuosa con el medio ambiente para su uso extensivo en distintos campos de la energía (Xing et al., 2019).

El propósito principal del estudio realizado por (Hindson & James, 2024),consistía en analizar el patrón de la superficie de la membrana empleada en el transcurso de la implementación del catalizador. En dicho estudio aseguran que es fundamental controlar que la membrana Nafion™ retenga y una de manera efectiva el catalizador, dado el elevado gasto relacionado con la aplicación de Pt. Tomando como referencia estudios previos que exploraron la noción de alteraciones de la superficie y obtuvieron hallazgos talentosos (Khoiruddin et al., 2017), el estudio de Hindson & James, ahondo en la propuesta mediante la experimentación de la inclusión de diseños en la superficie de la membrana.

En el análisis emplearon membranas perfluoradas del tipo Nafion™-117. Las láminas con una sección cuadrada de 5 centímetros de lado constaban de un grosor de 175 micrómetros y pertenecen a las membranas de intercambio iónico más habituales en el

mercado, lo cual será crucial al seleccionar una membrana para este proyecto. Las membranas tuvieron que someterse a la rugosidad de la superficie, al moldeado de la misma, al procedimiento correspondiente y a la incorporación del catalizador mediante un aerógrafo. El esquema que detalla los pasos de modificación de la superficie empleados en la investigación de Hindson & James se presenta en la Figura 10.



(A) **(B)** **(C)**

Figura 10. Modificación de la superficie de membranas Nafion™ para optimizar la eficiencia catalítica.

La información preliminar recolectada mostró cómo la energía es utilizada en los primeros 15 minutos de operación, mientras el electrolizador se calienta y llega a su temperatura ideal de operación. Después de eso, se experimentó una reducción gradual en el

uso de energía que se mantuvo de manera continua durante 30 minutos, resultando en un consumo estable de energía. En la representación se observan los primeros 15 minutos de actividad, evidenciando que la membrana C adquirió su punto máximo de corriente con 1.96 amperios y conservó un gasto constante de 0.46 amperios al concluir la evaluación. En cambio, la membrana A mostró el punto más bajo de 1.55 amperios y el menor gasto de corriente de 0.28 amperios al concluir la prueba.

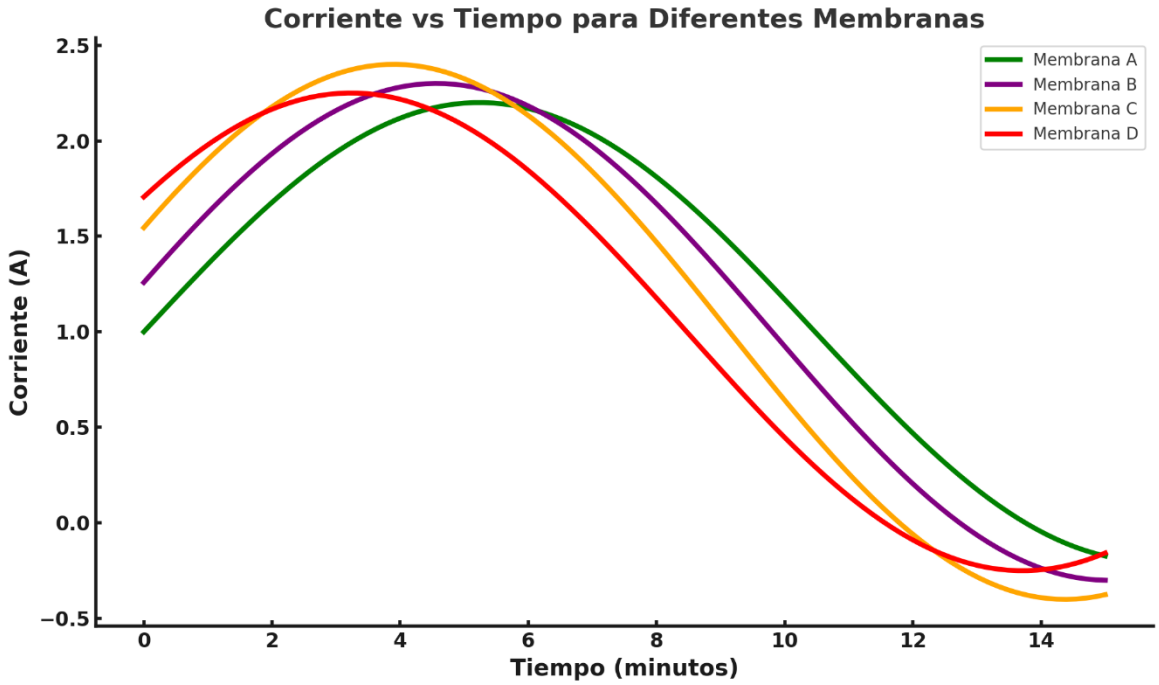


Figura 11. Consumo de energía en el proceso de electrólisis con membranas modificadas.

La originalidad de dicho estudio radica en su exhaustivo análisis de membranas impresas como método para potenciar de manera significativa la eficacia catalítica en el proceso de electrólisis PEM con el propósito de generar H_2 verde de forma sostenible. Estas



herramientas innovadoras, basadas en la investigación y el desarrollo tecnológico, tienen el potencial de transformar por completo el panorama actual y promover la aparición de tecnologías avanzadas para la producción H_2, las cuales no solo se caracterizan por ser más respetuosas con el medio ambiente, sino que también ofrecen ventajas económicas significativas.

2.4.2.2. Análisis Experimental Y Simulación De Redes Neuronales Artificiales En La Generación De Hidrógeno Como Combustible Ecológico En Un Reactor De Membrana De Sílice.

En términos generales, se han llevado a cabo diversos estudios acerca de la utilización de MR (reactor de membrana de sílice) con base en Pd. Dichas membranas son extremadamente selectivas en cuanto a dejar pasar el H_2 y posibilitan obtener un flujo de H_2 de gran pureza. No obstante, las grietas que surgen al someter las membranas a cambios de temperatura y la clara presencia de envenenamiento superficial de CO pueden disminuir la eficacia de las membranas de Pd. Por otro lado, las membranas hechas con paladio son sumamente costosas y su uso se ve limitado por su escasa capacidad de dejar pasar el H_2. Por consiguiente, es imperativo encontrar una opción más económica y práctica con prontitud. En este recorrido, de acuerdo con la información más precisa de (Ghasemzadeh et al., 2018), las membranas de cerámica, como las membranas de sílice con microporos, resultan ser más económicas y presentan una mayor velocidad de paso de hidrógeno. Sin embargo, en contraposición,



exhiben una menor capacidad de selección de hidrógeno en comparación con las membranas que se fundamentan en Pd. No obstante, no se ha realizado un estudio detallado de dichas membranas, empleadas para realizar la MSR (Assa et al., n.d.; Ghasemzadeh et al., n.d., n.d.; Ghasemzadeh, Morrone, & 2013, n.d.-b, n.d.-a; Ghasemzadeh, Morrone, ..., & 2015, n.d.; Jabbari et al., n.d.; D. Lee et al., n.d.). Los favorables resultados obtenidos han validado la importancia de examinar minuciosamente los beneficios que pueden derivarse al emplear sílice MR. En contraste, la modelización teórica ofrece una alternativa eficaz para la planificación y mejora de procedimientos químicos o de separación, en particular, la sílice MR utilizada en la ejecución de la reacción MSR. Existen diversas estrategias que se pueden emplear para crear modelos válidos con el propósito de realizar evaluaciones. Los valores de resistencia magnética pueden variar debido a las circunstancias de funcionamiento.

Ghasemzadeh et al., realizaron un estudio donde simularon la reacción de reformado con vapor de metanol en un reactor de membrana de sílice (MS) y en un reactor tradicional (RT), empleando un modelo innovador de ANN, el cual fue alimentado a priori con información experimental. Esto les permitió establecer una optimización óptima entre los principales indicadores de eficiencia durante las pruebas y las condiciones experimentales más favorables. La representación simplificada del montaje técnico se muestra de forma esquemática en la Figura 12. Dentro de la misma disposición experimental, se evaluó la eficacia del RT en contraste con la del MR de sílice.

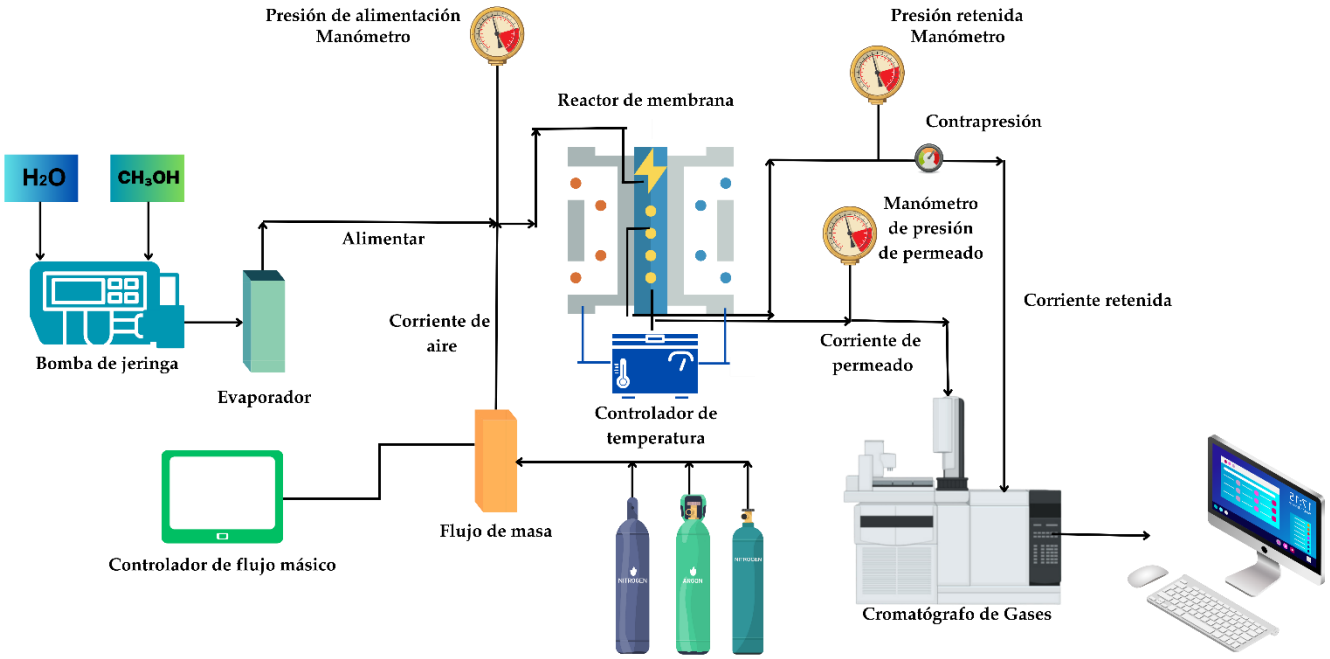


Figura 12. Representación gráfica de la instalación para el RM de sílice.

Actualmente, el componente de resonancia magnética de sílice está compuesto por un tubo de acero inoxidable hecho a medida (con un tamaño interno de 24 mm y una extensión de 260 mm) y una membrana de sílice con forma de tubo (con un tamaño externo de 10 mm, una extensión total de 65 mm y una longitud activa de 50 mm). En realidad, se pueden distinguir dos áreas: una zona donde ocurre la reacción, en la parte exterior del aparato (llamada carcasa), y la otra zona está en el interior de la membrana de sílice (llamada lumen), donde se captura el caudal de permeado, principalmente hidrógeno.

En la Figura 13 se encuentra un esquema que ilustra la porción de la membrana hecha de sílice. En ambos escenarios, se añade un gramo de un catalizador comercial de

Cu/ZnO/Al_2O_3 en el extremo del recipiente, tanto en el RM como en el RT, mientras se realizan evaluaciones de laboratorio con el fin de realizar la reacción de MSR. En una investigación previa realizada por los mismos autores se pueden encontrar pormenores adicionales.

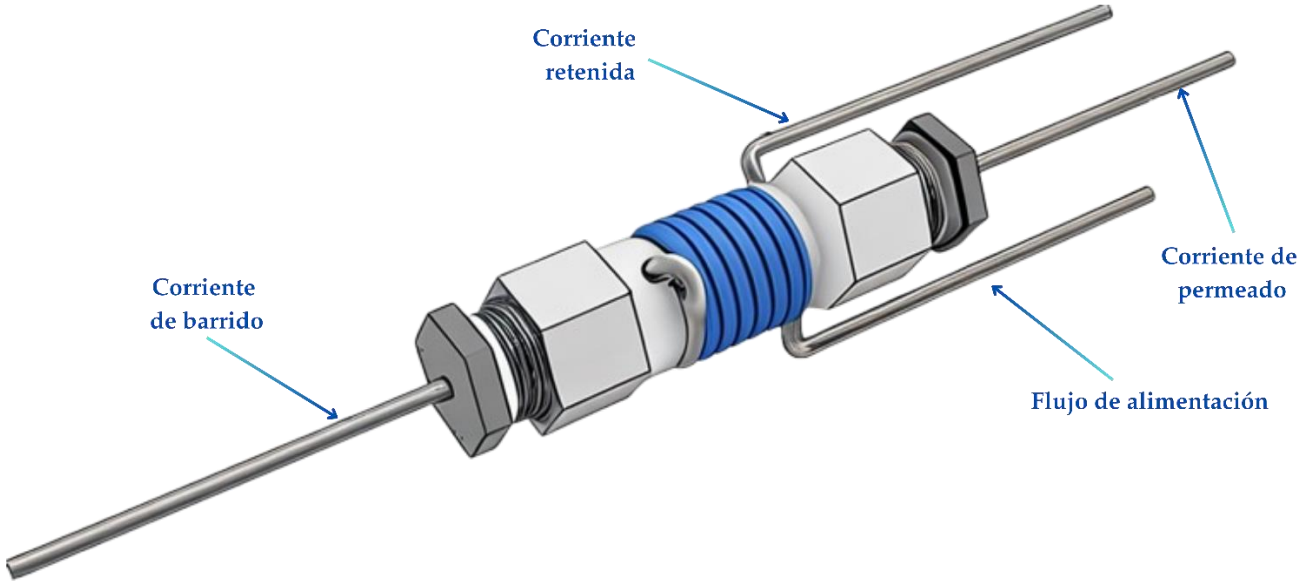


Figura 13. Esquema del sistema de separación con corriente de barrido, permeado y retenida.

La estructura de ANN se compone de neuronas artificiales. Las neuronas se organizan en estratos y establecen conexiones paralelas para interactuar entre sí. Tal y como se muestra en la Figura 14, la neurona más básica se caracteriza por recibir una entrada escalar (M) que se multiplica por un peso escalar (W). A este producto ponderado (MW) se le añade un segundo valor escalar llamado sesgo (B). Después, la salida de esta operación (suma del peso multiplicado por la entrada más el sesgo) es transferida a una función específica. Modificar

el peso y el sesgo de manera proporcional posibilita la ejecución de una tarea concreta por parte de la red o la manifestación de un comportamiento apropiado. Al finalizar, este procedimiento produce un resultado unidimensional (O). Es importante destacar que durante el proceso de entrenamiento se pueden modificar los parámetros W y B.

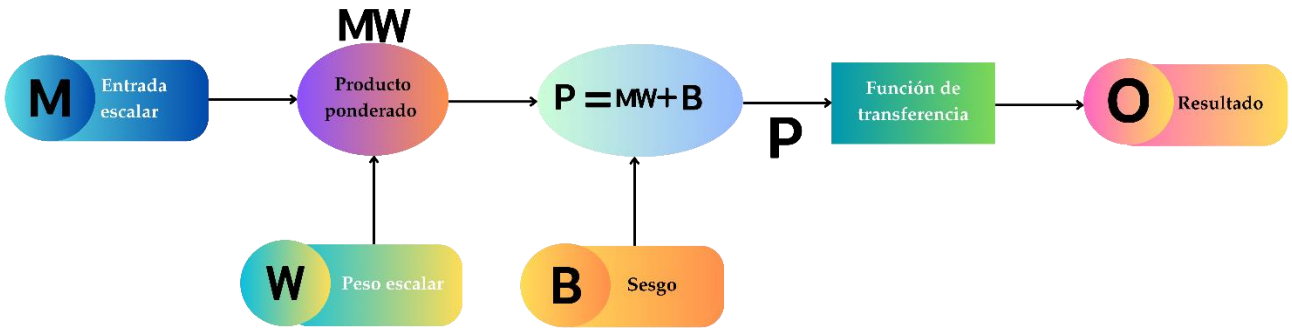


Figura 14. Esquema de simulación de redes neuronales.

Los resultados indicaron que el RM supera al TR en términos de conversión de metanol y recuperación de H_2, siendo la temperatura de reacción el parámetro más influyente en su rendimiento. Se llevaron a cabo experimentos en un rango de temperatura de 513 a 573 K, y se optimizaron condiciones operativas como la relación de vapor/metanol y la presión transmembrana, lo que mejoró significativamente la producción de H_2. Además, el modelo ANN, entrenado con datos experimentales, demostró una alta precisión en sus predicciones, con errores en la recuperación de H_2 y la selectividad de CO que se mantuvieron por debajo del 8% y 9%, respectivamente. Estos hallazgos sugieren que el uso de un reactor de

membrana de sílice es una opción prometedora para la producción de H_2, y que el modelado con redes neuronales representa una técnica eficaz para maximizar su eficiencia.

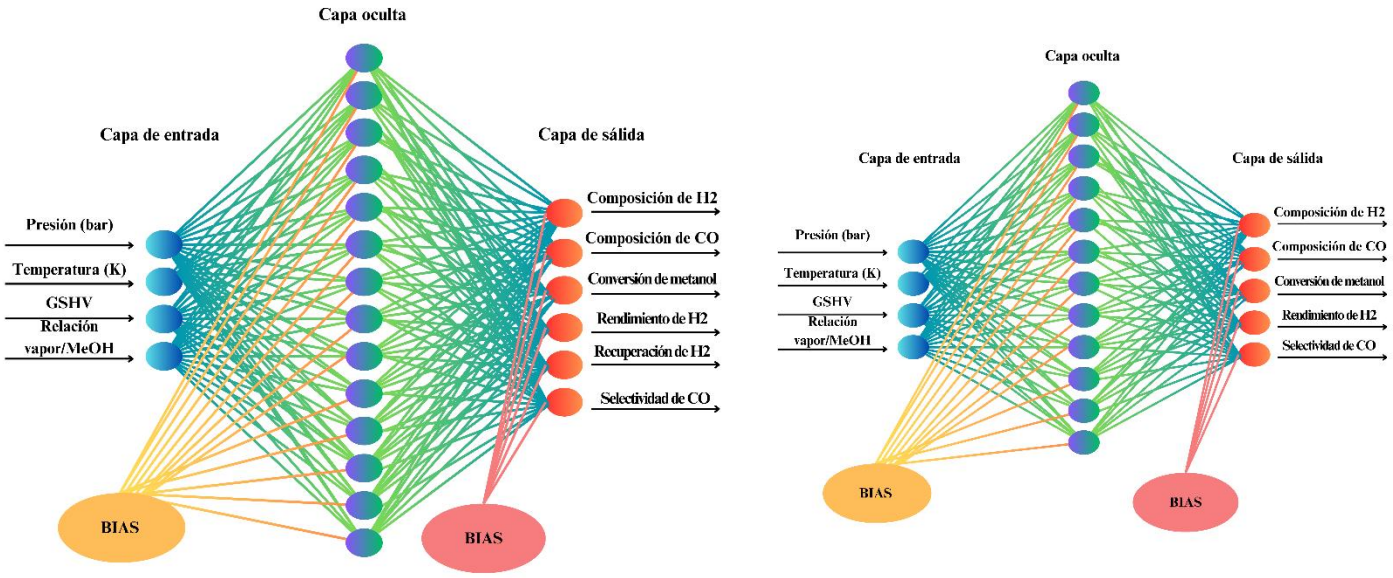


Figura 15. Comparativa de la eficiencia entre reactor de membrana y reactor tradicional.

2.4.3. Catalizadores Mononucleares En La Reacción Electroquímica De Producción De Hidrógeno: Simulación Por Computadora E Indagación Práctica.

Los catalizadores de átomo único (SAC) son considerados como unos catalizadores muy atractivos para lograr una excelente función en la reacción de hidrogenación gracias a sus singulares propiedades electrónicas y estructurales. Estos materiales presentan una



distribución homogénea de los átomos metálicos a lo largo del soporte, lo que les confiere una alta actividad catalítica y selectividad en diversas reacciones químicas (Ali et al., 2021; Humayun, Israr, Khan, et al., 2023; Humayun, Israr, Li, et al., 2023). Los sistemas SAC pueden mejorar significativamente la eficiencia de la habilidad catalítica de HER y reducir la dependencia de metales valiosos que son escasos en la naturaleza. Los sistemas de almacenamiento y liberación de catalizadores tienen una evidente superioridad en comparación con los catalizadores a granel gracias a su extensa área de superficie específica, estructura electrónica altamente flexible y desempeño catalítico significativamente optimizado en diversas reacciones químicas. Estas cualidades sobresalientes emergen de los sitios activos minuciosamente regulados a nivel atómico, lo cual posibilita conexiones altamente efectivas con los reactivos (Yang et al., 2023). No obstante, a día de hoy, aún persisten ciertas restricciones y desafíos, tales como la cuestión preocupante a la continuidad de los SAC. Los átomos individuales soportados siempre tienden a aglomerarse y unirse entre sí, lo cual conlleva una disminución significativa en la eficiencia catalítica del catalizador. Asimismo, es importante tener en cuenta que la reactividad y la configuración electrónica de los SAC son altamente receptivos al ambiente específico en el que se encuentran, lo que los hace susceptibles a posibles procesos de envenenamiento causados por la presencia de reactivos o intermediarios no deseados. Además, resulta extremadamente complicado conservar su equilibrio estructural en situaciones de reacciones químicas extremadamente adversas (Humayun, Israr, Khan, et al., 2023)



(W. Chen et al., 2017)llevaron a cabo un experimento en el que fijaron de manera precisa átomos individuales de molibdeno (Mo) en una matriz de grafeno relleno con nitrógeno, lo cual resultó en un desempeño destacado en contraste con los catalizadores de Mo_2C y MoN en grandes cantidades, demostrando incluso una mayor estabilidad que la ofrecida por el Pt/C utilizado comercialmente. La estimación de la energía libre de Gibbs (ΔG_{H^*}) para el sitio Mo $_1N_1C_2$ mostró valores cercanos a cero, lo cual sugiere que el catalizador SAC en su forma actual es sumamente eficaz en el proceso de generación de H_2. La densidad de estados (DOS) del sitio $Mo_1N_1C_2$, de acuerdo con los cálculos realizados, demostró que colocar átomos de Molibdeno en la superficie del grafeno es capaz de optimizar significativamente el dominio del electrón d cerca del nivel de Fermi, lo cual tuvo un impacto positivo en el desempeño catalítico de manera significativa.

Según la investigación realizada por Qiu y sus colegas (Qiu et al., 2015) , se observó que la introducción de un único átomo de níquel (Ni) en la estructura del grafeno, reemplazando un átomo de carbono (C), resultó en un notable aumento en la eficiencia de la reacción de hidrogenación electroquímica (HER) y en una mayor estabilidad a lo largo de múltiples ciclos de uso. Las simulaciones de densidad funcional teóricas confirman que los compuestos alternativos, en particular aquellos que se encuentran en los sitios C de la estructura del grafeno (Ni_{sub}), presentan un desempeño sorpréndete en la reacción de hidrogenación electroquímica en contraste con el átomo de níquel vinculado a los defectos en la red de grafeno (Ni_{def}). Junto a estos, los SAC fundamentados en MoS_2 con



esquemas singulares y propiedades electrónicas mostraron una mayor eficacia catalítica para la producción de H_2 en contraste con el MoS_2 original. Activar los átomos de azufre en la superficie resulta ser una estrategia eficiente para potenciar la función HER del MoS_2, ya que hay pocos lugares en los bordes y gran cantidad de átomos de azufre sin aprovechar en la estructura basal del MoS_2 (Hinnemann et al., 2005; Jaramillo et al., 2007).

2.4.3.1. Enfoques Computacionales De Los SAC Para La Producción De H_2.

La implementación de la DFT en este ámbito ha sido revolucionaria, dado que ha brindado un entendimiento detallado de las conexiones a un grado atómico y las características electrónicas de los SAC. La DFT es un método importante en el modelado cuántico para estudiar las configuraciones electrónicas de los materiales. Este método es muy importante cuando se estudian pequeños catalizadores que ayudan a producir gas hidrógeno, donde ser muy preciso con los detalles electrónicos es clave para maximizar el proceso. y hacerlo más eficiente (Fung et al., 2020; Tosoni et al., 2023). Juegan un papel central en anticipar y aclarar los comportamientos de estos catalizadores. Ayuda a predecir y explicar cómo funcionan estos catalizadores. Esta teoría nos ayuda a comprender cómo se comportan los átomos en su entorno y es crucial para crear y mejorar catalizadores, haciéndolos funcionar mejor.



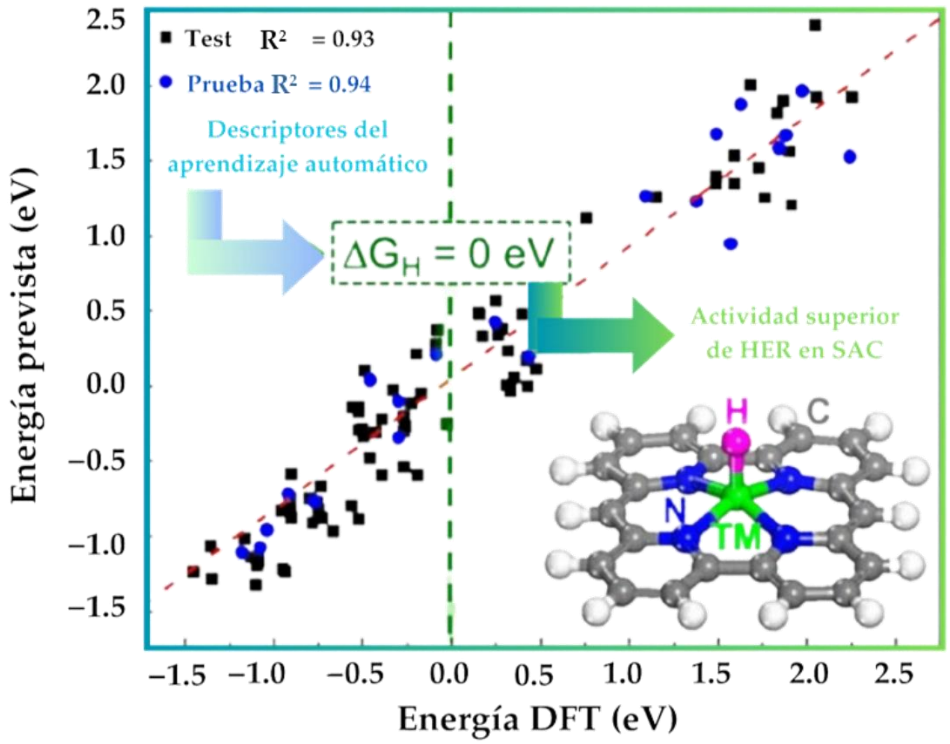


Figura 16. Modelo computacional de un catalizador de átomo único (SAC) para la producción de hidrógeno.

Una de las principales aportaciones de la DFT en el estudio de los SAC es el examen detallado de su composición electrónica. A través de los estudios de DFT, es posible obtener información sobre las distribuciones electrónicas a nivel atómico, los niveles de energía involucrados, y cómo estos aspectos afectan la capacidad de reacción en procesos como la adsorción y liberación de H_2. Entender la configuración electrónica es fundamental para que los investigadores puedan estimar y ajustar las funciones catalizadoras de diferentes SAC, optimizando su rendimiento en reacciones como la evolución de hidrógeno (HER). Los datos



teóricos que ofrece la DFT son esenciales para la creación y el perfeccionamiento de estos catalizadores. Además, las modelaciones basadas en DFT permiten proyectar diversas combinaciones de átomos y sustratos, anticipando sus relaciones y el comportamiento catalítico generado. Esta capacidad predictiva es clave para identificar SAC con gran potencial, acelerando considerablemente el proceso de investigación.

2.5. Innovaciones en la electrólisis del agua de mar

Peter y su equipo llevaron a cabo un estudio detallado de la oxidación electrolítica en agua salina, presentando un gráfico de Pourbaix simulado que abarcaba tanto la evolución de oxígeno (REA) como la química del cloro (Figura 17) (Dionigi et al., 2016; Tong et al., 2020) . Su investigación muestra que la evolución de cloro (ClER) en condiciones de pH ácido (<3) y la formación de hipoclorito a pH elevado (>7.5) son las principales reacciones que rivalizan con la REA. Estas reacciones están descritas mediante las siguientes ecuaciones:

$$2Cl^- \rightarrow Cl_2 + 2e^- \ (E^0 = 1.36\ V\ Vs\ SHE)\ ClER\ (ácido) \quad (2)$$

$$Cl^- + 2OH^- \rightarrow ClO^- + H_2O + 2e^- \ (E^0 = 0.89\ V\ Vs\ SHE)\ generación\ de\ hipoclorito\ (básico) \quad (3)$$

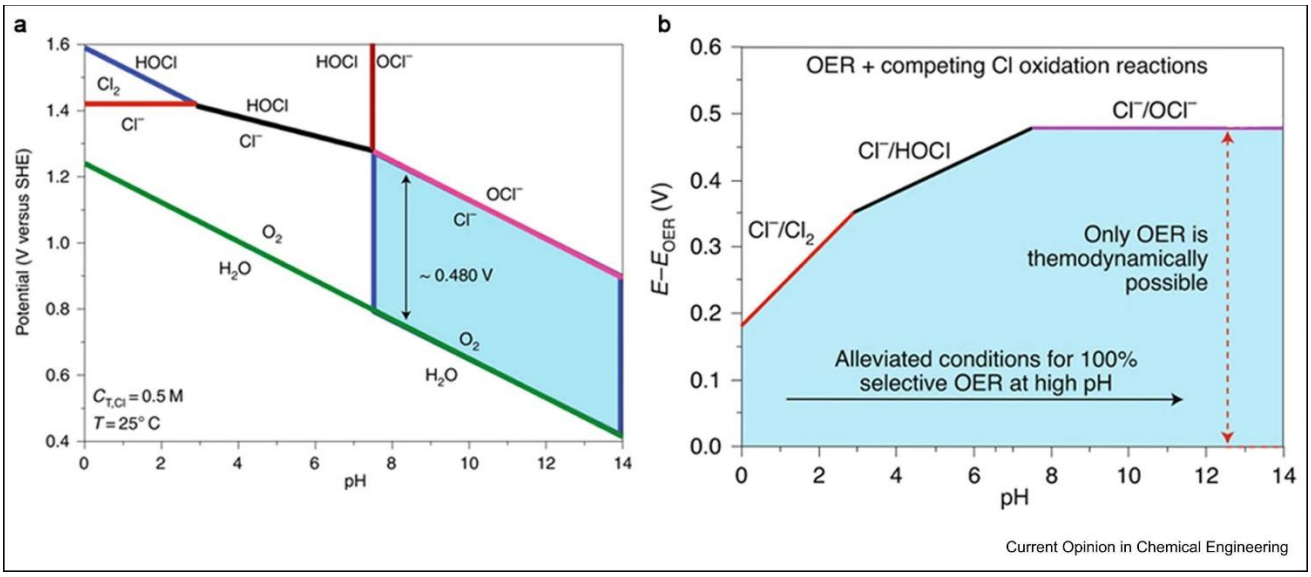


Figura 17. Estudio de la oxidación electrolítica en agua salina con la influencia de pH.

Aunque desde el punto de vista termodinámico se privilegia la REA, tanto la ClER como la formación de hipoclorito, como se indica en las fórmulas (5) y (6), son procesos que implican la transferencia de dos partículas cargadas. Esto las hace más favorables desde el punto de vista cinético en comparación con la REA, que requiere la participación de cuatro electrones. De manera interesante, el resultado de la oxidación del ion Cl^- cambia de HOCl a OCl^- a medida que el electrolito se vuelve básico, y la diferencia de potencial termodinámico preservará de manera constante una separación de 480 mV con la reacción OER (Dionigi et al., 2016; F. Y. Gao et al., 2022; Tong et al., 2020).

Dicho de otra manera, al utilizar un material catalítico de elevada eficiencia en un entorno básico y mantener el exceso de potencial por debajo de 480 mV, se podría, en teoría,



evitar completamente la reacción oxidativa del ion cloruro. Este enfoque es conocido como los "principios de configuración básica " para la electrolítica del agua salada (Dionigi et al., 2016; F. Y. Gao et al., 2022; Tong et al., 2020).

2.5.1. Catalizadores Electroquímicos Aplicados Para La Electrólisis Del Agua Marina.

En la Figura 18, se muestra la evaluación de la actividad de varios materiales catalíticos bajo distintas circunstancias experimentales, como medios ácidos, alcalinos, neutros, agua de mar artificial y agua de mar natural. Los científicos realizaron estos estudios en una variedad de entornos, ya que la composición del agua de mar es bastante intrincada, y el nivel de acidez o alcalinidad juega un papel fundamental en la reacción HER y REA (Liu et al., 2023).

En particular, el lado positivo de la evaluación electrolítica del agua marina es extremadamente complejo. La reacción de evolución de oxígeno (REA) requiere un potencial adicional considerablemente alto, ya que es un proceso que involucra la transferencia de cuatro partículas cargadas, lo que ralentiza su desarrollo debido a las limitaciones cinéticas. En un sistema de análisis electrolítico del agua marina, la reacción oxidativa del cloruro es un proceso competitivo que debe ser evitado, lo que dificulta aún más la reacción en el electrodo positivo. Entre los materiales catalíticos empleados en la producción de oxígeno durante la electrólisis de agua pura, además de los metales nobles como el iridio y el rutenio, diversos compuestos como los óxidos de metales de transición, nitruros, hidróxidos,



complejos enriquecidos con fósforo, y los hidróxidos laminares dobles (LDH) han demostrado una alta eficiencia (Duan et al., 2019; M. R. Gao et al., 2017). El gráfico en la Figura 18 revela que, al observar únicamente la intensidad de corriente y el potencial adicional, los resultados de varios materiales catalíticos para la REA muestran diferencias leves. Esto se debe a que solo una parte de la corriente es utilizada para la REA, mientras que la reacción oxidativa del cloruro demanda un gasto energético extra. No obstante, el proceso de revisión electrolítica del agua marina es considerablemente más complicado en la realidad.

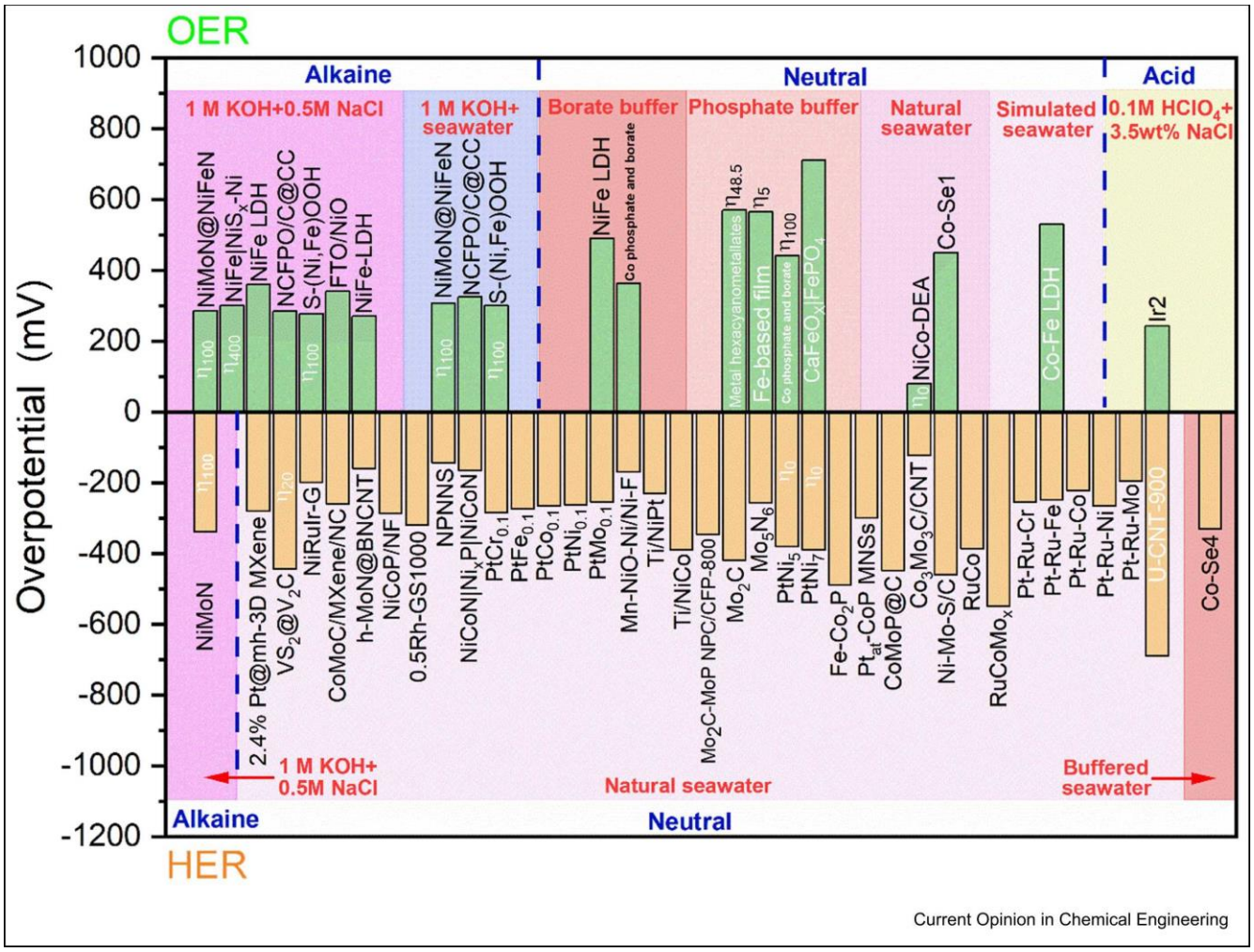


Figura 18. Evaluación de materiales catalíticos en la reacción de evolución de oxígeno (OER) en agua marina.

Varios materiales catalíticos demuestran un desempeño sobresaliente tanto en agua marina como en su versión artificial (Figura 19a y 19b). Sin embargo, las reacciones de REA y de hidrógeno en agua salina natural tienden a experimentar una caída en su eficiencia en la mayoría de los escenarios (Figura 19c–e). Este fenómeno ocurre principalmente debido a la

abundancia de partículas cargadas de contaminantes presentes en el agua marina. La ClER generada por los iones Cl^- rivaliza con REA, mientras que la acumulación de metales pesados en el agua afecta negativamente la eficiencia catalítica del electrodo negativo durante la reacción de evolución de hidrógeno (HER). A continuación, vamos a examinar las reacciones OER y HER en la electrólisis del agua marina por separado.

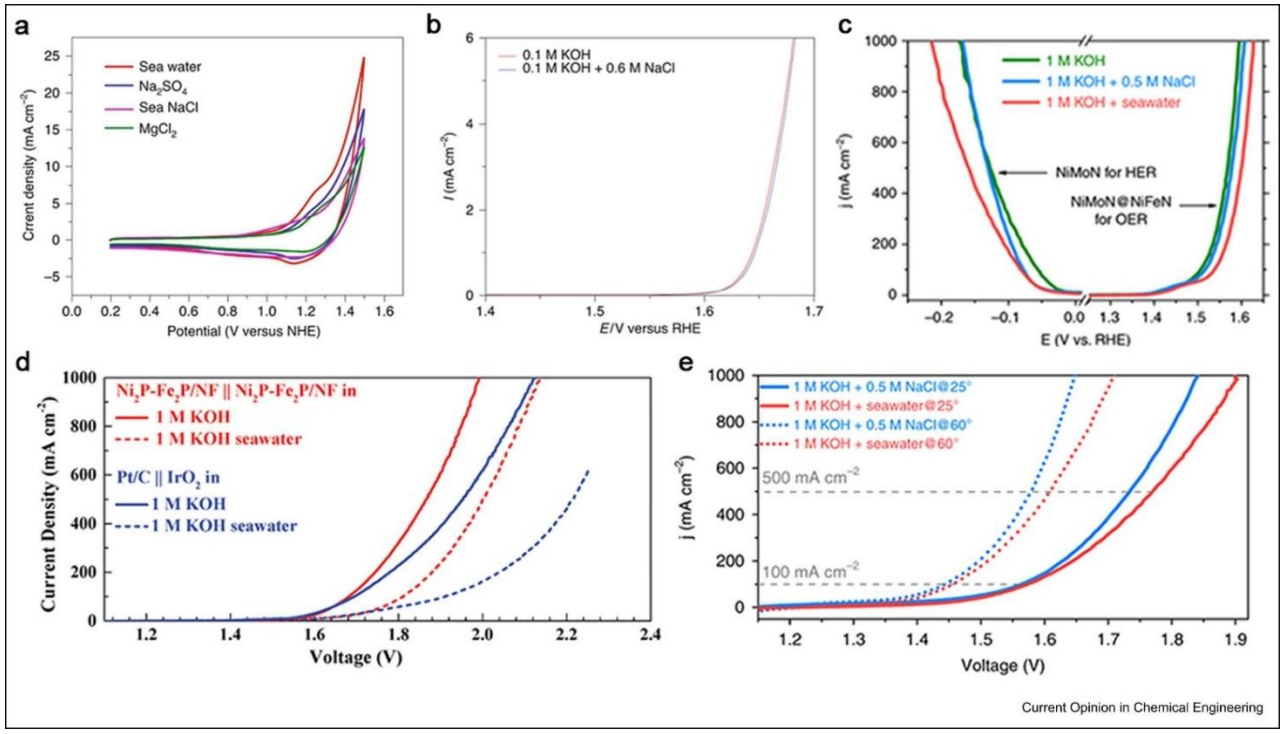


Figura 19. Desempeño de catalizadores para la reacción de evolución de hidrógeno (HER) en sistemas de electrólisis de agua marina.



2.5.2. Materiales Catalíticos Para La OER Aplicados A La Electrólisis De Agua Salina

Como se señaló previamente, el desafío clave en el análisis electrolítico del agua marina en el lado del electrodo positivo es que la ClER rivaliza directamente con la REA. Para diseñar materiales catalíticos específicos para la OER en la electrólisis del agua marina, se han examinado diversas tácticas. Por ejemplo, se ha planteado un criterio de configuración para OER/ClER en un entorno básico, donde el dispositivo electrolítico que trabaja con agua marina opera a un pH mayor de 7.5. De este modo, se maximiza la brecha de potencial energético entre los procesos de REA y ClER. Se han creado hidróxidos de níquel-hierro, reconocidos por ser materiales catalíticos OER altamente activos y resistentes en medios básicos, con el objetivo de mejorar la precisión de OER en ambientes marinos.

Peter y su equipo analizaron el material catalítico LDH de NiFe en una disolución de KOH 0.1 M, así como en un electrolito mixto compuesto por KOH 0.1 M y NaCl 0.5 M. En ambos casos, el sistema demostró una eficacia farádica cercana a la perfección en la producción de oxígeno (Kundu et al., 2018). El equipo también analizó el rendimiento del material catalítico LDH de NiFe en un sistema AEMWE. A un potencial de electrólisis de 1,6 V, lograron una intensidad de corriente de 200 mA/cm², con una durabilidad superior a las 100 horas (Dresp et al., 2018). Otra alternativa es desarrollar catalizadores de REA que operen en entornos básicos o ácidos, con una exclusividad total hacia la REA gracias a los



sitios activos ajustados para los intermediarios de reacción en la superficie catalítica. Un ejemplo de ello son los compuestos basados en cobalto, que muestran una gran selectividad por la OER en lugar de la oxidación de cloruros. Nocera y su equipo informaron que los catalizadores de (oxi)hidróxido/fosfato de cobalto (Co-Pi) y de (oxi)hidróxido/borato de cobalto (Co-Bi) son capaces de funcionar en diversos medios electrolíticos como agua destilada, aguas de ríos y océanos, logrando excelentes resultados en REA. Concretamente, encontraron que el Co-Bi logró una eficacia farádica del 100% en agua marina natural(Keane & Nocera, 2019).

En fechas recientes, se ha planteado la posibilidad de incorporar una barrera en la zona anódica para repeler los iones Cl^- de la región catalítica. Un ejemplo son las capas de MnO_x, que habitualmente alcanzan una eficiencia superior al 90% en la OER dentro de un rango de acidez de 1 a 10. No obstante, cuando el pH es menor de 1, la reacción ClER es privilegiada tanto energéticamente como cinéticamente. Koper y su equipo observaron que al agregar MnO_x sobre IrO_x, la eficacia de la OER aumentaba del 14% a más del 90%. La capa de MnO_x bloquea el paso de los iones Cl^- al funcionar como una barrera no catalítica, transitable a los cationes y altamente exclusiva (Vos et al., 2018). Otra estrategia para frenar la reacción de evolución de cloro (ClER) es aplicar un revestimiento de CeO_x sobre catalizadores OER como $NiFeO_x$ y CoO_x, lo que impide que el cloruro intervenga en la oxidación del agua marina (Obata & Takanabe, 2018) .



No obstante, este tipo de recubrimiento anticorrosivo solo es capaz de soportar bajas concentraciones de iones salinos, lo que señala la necesidad de optimizarlo para la electrólisis eficiente del agua marina. Las futuras investigaciones tendrán que enfocarse en diseñar catalizadores OER con alta selectividad para la electrólisis del agua marina y optimizar la durabilidad de dichos catalizadores durante el proceso.

2.5.3. Materiales Catalíticos Para La Evolución De Hidrógeno En Sistemas De Electrólisis De Agua Marina.

En contraste con la reacción OER que ocurre en el ánodo, el cátodo en un sistema de electrólisis de agua marina se enfrenta a desafíos relacionados con la durabilidad a largo plazo de los materiales catalíticos utilizados en la HER, debido a la presencia de impurezas que tienen el potencial de obstruir y desgastar los puntos activos del catalizador. En los últimos tiempos, se han publicado escasos estudios sobre la durabilidad de los electrocatalizadores HER en la electrólisis del agua marina. Durante las situaciones de reacción HER, una variedad de cationes indeseables, como Ca^{2+} y Mg^{2+}, tienen el potencial de provocar la pérdida de efectividad del catalizador al acumularse como hidróxidos en la superficie del cátodo (Han et al., 2022). Los depósitos formados en el cátodo durante la electrólisis del agua marina consisten mayormente en $Mg(OH)_2$, cuya solubilidad es extremadamente baja ($Ksp=1.5\times10^{-11}$). La formación química de $Mg(OH)_2$ se produce cuando el pH de la superficie del cátodo alcanza valores entre 10.7 y 11.0 (Bennett, 1980).



Esta acumulación de sales sobre el cátodo, incluso en períodos breves (<24 horas), puede ocasionar una disminución de la densidad de corriente superior al 50%.

Los diversos mecanismos de reacción, como la acumulación, cristalización y generación de hidróxidos de metales en el agua salina sobre la zona catódica, están directamente vinculados con las partículas iónicas presentes y el rango de potencial aplicado. Algunos estudios han documentado el uso de barreras protectoras en el cátodo, tales como $Cr(OH)_3$ [24], MnO_x [25] o una capa de grafito [26], con el fin de evitar el bloqueo catalítico. No obstante, los principios que explican el bloqueo causado por diversos cationes en el agua de mar, que afectan la HER, siguen siendo cruciales, pero aún poco explorados.

2.5.4. Equipos Para La Electrólisis De Agua Salina

Las técnicas para la electrólisis del agua generalmente se agrupan en la bibliografía según el tipo de electrolitos que emplean. Seguidamente, se describen tres opciones de electrólisis de agua a temperaturas reducidas (menos de 100 °C) que pueden llevar a cabo la electrólisis del agua marina (ver Tabla 2):

Tabla 2. Propiedades de tres clases de electrolizadores para agua marina.

	PEMWE	DWE	AEMWE
Temperatura operativa	50–80 °C	20°C	40–60 °C
Presión operativa	<70 bares	Presión atmosférica normalizada	<35 bares



Electrodo	Membranas compuestas de ácido perfluorosulfónico	H_2O marina	Estructura polimérica de divinilbenceno con $NaHCO_3$ o KOH
Catalizador anódico	IrO_2	–	Combinaciones de Ni o NiFeCo
Catalizador del cátodo	Nanopartículas de platino depositadas sobre carbón negro	–	Níquel de alta superficie específica
Ánodo con estructura de transporte porosa	Titanio sinterizado y permeable con cobertura de platino	–	Espuma de níquel
Cátodo con estructura de transporte porosa	Malla de carbono o titanio sinterizado y permeable	–	Tela de carbono o espuma de níquel
Ánodo con placa de doble polaridad	Titanio revestido con platino	–	Acero inoxidable con revestimiento de níquel
Cátodo con placa de doble polaridad	Titanio revestido con oro	–	Acero inoxidable con revestimiento de níquel

En el dispositivo electroquímico DWE, la solución conductora es directamente agua salina. El fenómeno de análisis electrolítico en este sistema es bien reconocido en el sector químico, bajo la denominación del método cloro-sosa. Los estudios realizados empleando un generador de cloro de piscinas de uso comercial revelan que se requiere un potencial de 4.0 V para alcanzar una densidad de corriente de 10 mA/cm² durante la electrólisis del agua marina. Es crucial preservar el rendimiento energético de la transformación electroquímica, al mismo tiempo que se garantiza la durabilidad frente a la corrosión del electrodo en el sistema DWE. Por eso, el electrodo se fabrica a partir de una base de titanio recubierta con una fina película de platino, iridio y rutenio. Sin embargo, la recepción de ciertos iones extraños e imprevistos (especialmente Mg^{2+} y Ca^{2+}) sobre el cátodo podría disminuir significativamente la eficiencia del proceso de liberación de hidrógeno (HER) durante la electrólisis de agua salada.



El sistema PEMWE emplea agua líquida de gran pureza como fuente de alimentación y utiliza un polímero sólido como medio electrolítico (como la membrana de Nafion). Este método es el más vulnerable a la presencia de contaminantes en el agua. Un caso particular es que la aparición de iones de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) puede desencadenar la creación de precipitados de hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) e hidróxido de magnesio ($Mg(OH)_2$) en la zona del cátodo (Buttler & Spliethoff, 2018; d'Amore-Domenech et al., n.d.).

Con los desarrollos que se esperan en el futuro, la AEMWE podría ser más adecuada para funcionar con agua sin purificar. Debido a que tanto el electrodo positivo como el negativo trabajan en un ambiente ligeramente alcalino, se pueden usar catalizadores compuestos de metales comunes y piezas de acero más económicos. A diferencia del PEMWE, el entorno alcalino en la AEMWE también mejora la cinética de la reacción OER. En este enfoque, el agua se envía únicamente al electrodo positivo, desde donde se desplaza a través de la membrana hacia el electrodo negativo. La capacidad de la membrana para filtrar iones podría ralentizar la transferencia de impurezas cargadas positivamente hacia el electrodo negativo desde el agua marina, lo que ayudaría a minimizar los niveles de acumulación en dicho electrodo. Dado que el conflicto entre la oxidación de OH^- y Cl^- es un inconveniente inevitable en un mecanismo de electrólisis con agua marina, es esencial utilizar una membrana de intercambio aniónico para evitar el transporte no deseado de aniones como



el Cl^-. Estudios actuales han demostrado que la AEMWE puede abordar varios retos técnicos en la electrólisis de agua salada, tales como:

- Con el fin de estabilizar el pH en la zona del electrodo, los sistemas comerciales de AEMWE utilizan niveles de carbonato que varían entre el 0.1% y el 10% en peso en las fuentes de agua, superando con creces la cantidad de carbonato presente en el agua marina (~0.01% en peso). Esto permite llevar a cabo la electrólisis directa del agua salina tras un proceso de pretratamiento básico (Miller et al., 2020).
- Aunque haya cloruros presentes, algunos catalizadores empleados en AEMWE muestran una operatividad sobresaliente e incluso aumentan su rendimiento. Un ejemplo sería el compuesto catalítico de hidróxidos laminares de níquel y hierro, donde los estudios realizados en condiciones de trabajo han demostrado que la introducción de Cl^- favorece la conversión de la fase α a la fase γ activa, mejorando así la energía requerida para la generación de oxígeno (Dresp et al., 2021).

Es importante destacar que la durabilidad de la membrana en diferentes celdas electrolíticas puede influir significativamente en la longevidad del dispositivo (Lindquist et al., 2020). Para PEMWE, se han diseñado membranas de intercambio de protones, siendo la membrana Nafion la más popular gracias a su alto rendimiento y resistencia química. En el



caso de AEMWE, existen diversas membranas aniónicas, aunque la mayoría aún presentan deficiencias en cuanto a su desempeño y resistencia a reacciones químicas, y no existe ningún material con una ventaja claramente destacada frente a la competencia. Las membranas aniónicas pueden sufrir varios tipos de degradación química, como el ataque nucleofílico, la eliminación de Hofmann, las reacciones con radicales de oxígeno y entre otros (Lindquist et al., 2020). El desgaste físico de las membranas en los sistemas PEMWE y AEMWE constituye un problema relevante en los procesos de electrólisis con agua salada. Los iones contaminantes presentes en el agua marina pueden formar depósitos sólidos en la membrana, lo que provoca una disminución irreversible en su eficiencia. Este desgaste afecta el paso de H^+ en PEMWE y de OH^- en AEMWE. Asimismo, las impurezas pueden incrustarse en la membrana catiónica de PEMWE, aumentando su resistencia y ralentizando el flujo de agua, lo que reduce considerablemente su durabilidad (F. Y. Gao et al., 2022)



Metodología

3.1. Reglamentos para el estudio del agua

El paso inicial para implementar una metodología de evaluación multicriterio que determine la viabilidad de las posibles reservas de agua para generar H_2 a través de electrólisis consistió en identificar todas las alternativas de agua que podrían ser utilizadas en el electrolizador. Además, se analizaron detalladamente los procedimientos requeridos para garantizar el suministro de agua, abarcando las etapas de extracción, transporte, tratamiento y almacenamiento. Cada una de estas etapas fue evaluada con el propósito de traducirlas en términos de costo asociado al suministro del recurso hídrico.



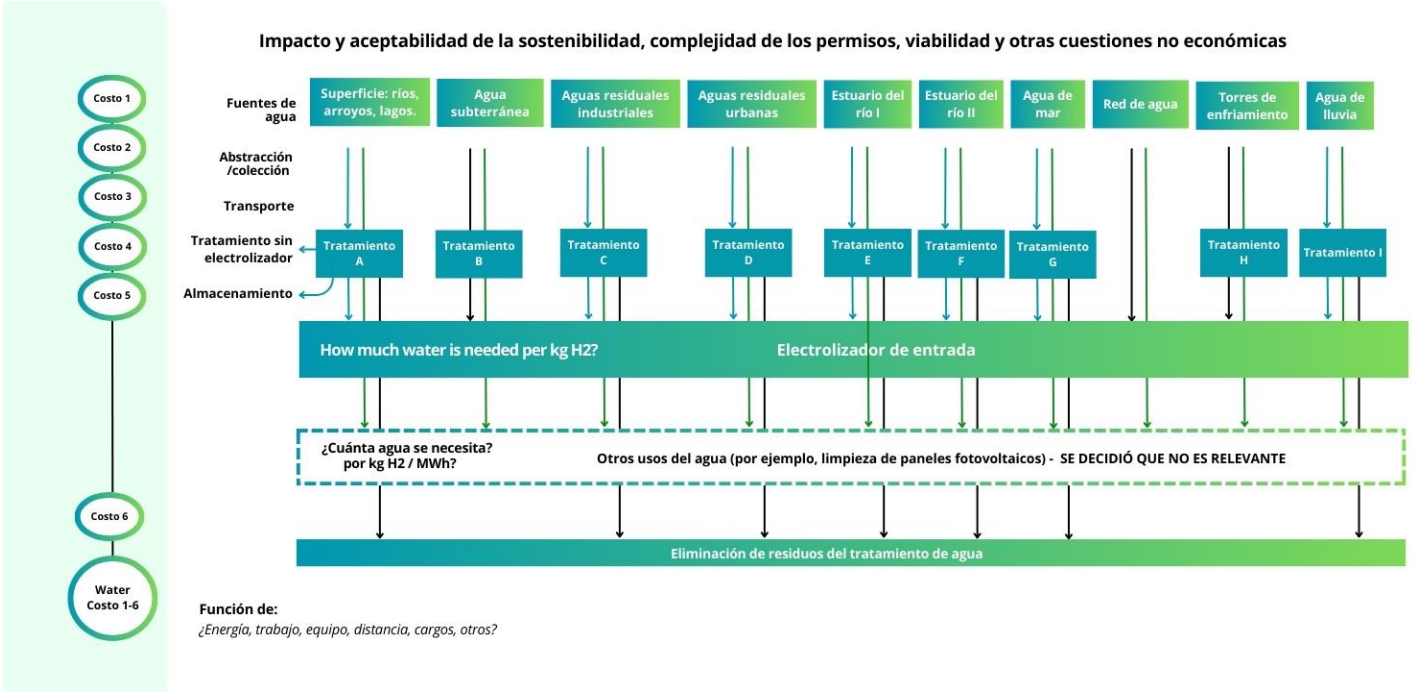


Figura 20. Visión general de la estrategia adoptada para analizar alternativas de agua (H_2O) destinadas a la generación de H_2 mediante el proceso de electrólisis del H_2O.

Como se muestra en la Figura W, se reconocieron nueve posibles fuentes de H_2O, que incluyen: H_2O marina, estuarios (con salinidades distintas a las del agua de mar), H_2O superficiales (que abarcan arroyos, ríos, riachuelos y lagos), H_2O subterráneas, agua pluvial, H_2O proveniente de la red pública, efluentes urbanos, desechos líquidos industriales y H_2O utilizada en torres de enfriamiento. Asegurar el abastecimiento de H_2O para los electrolizadores conlleva las siguientes etapas: captación o recolección del recurso hídrico, traslado hacia la planta de producción de H_2, almacenamiento del H_2O, procesamiento para



alcanzar los estándares técnicos exigidos por el electrolizador y disposición de los desechos generados durante el proceso de acondicionamiento.

Estas etapas del abastecimiento de H_2O no se presentan en un orden fijo y, de hecho, pueden organizarse de manera diferente según la ubicación específica de la fuente de agua considerada (por ejemplo, el almacenamiento puede ocurrir antes o después del procesamiento del agua, o incluso en ambos momentos). Todas estas fases generan gastos vinculados, además de pérdidas de H_2O, que fueron calculadas y se describen en los apartados siguientes.

Se ha considerado que, en el caso de algunas fuentes (como el agua de la red pública), ya está presente una infraestructura que facilita el suministro de agua directamente al electrolizador. En contraste, para la mayoría de las otras fuentes, será necesario construir desde cero, o al menos una parte significativa de, la infraestructura requerida para extraer, transportar, almacenar y tratar el agua. Además, cada fuente de agua potencial puede ser caracterizada según los siguientes criterios cualitativos: confiabilidad en su disponibilidad, facilidad de extracción o recolección, existencia de usos concurrentes del recurso, complejidad del sistema de transporte, dificultad del proceso de tratamiento necesario, aceptación por parte de la sociedad y, finalmente, el tipo de trámite requerido para obtener los permisos correspondientes.



3.1.2. Fuentes posibles de agua y requisitos de tratamiento

El agua de alta calidad es fundamental como insumo para los electrolizadores, ya que las contaminantes pueden influir en la reacción al acumularse en los electrolizadores, en las caras de los electrodos y/o en la membrana (Zeng et al., n.d.). Las especificaciones de calidad del agua varían según el fabricante de electrolizadores, pero generalmente se requiere agua desionizada, tal como el agua de clase I o II, conforme a lo establecido por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) 1, o con una conductividad ligeramente superior, de <5 µS/cm. En consecuencia, la mayoría de los electrolizadores disponibles en el mercado integran un proceso de desionización dentro de su sistema.

Para los propósitos de este proyecto, se requieren valores de 10.00 a 11.12 l por kg de H_2 producido para alimentar el electrolizador exclusivamente para la reacción (para electrolizadores PEM y alcalinos, respectivamente). Estos valores se basan en información pública proporcionada por distintos fabricantes de electrolizadores como Kraftanlagen München GmbH, Hydrogenics, GreenHydrogen.dk y H-Tec Systems GmbH. Además, al contemplar una pérdida de agua del 10% (debido a evaporación, fugas, entre otros) y asumir que se requiere un 25% adicional de agua para la limpieza del sistema, el consumo de agua necesario para alimentar el electrolizador se estima entre 13.50 y 15.00 L de agua por kg de H_2 (Simoes et al., 2021).



La Tabla 3 presenta un resumen de los requerimientos unitarios de agua "promedio" analizados en esta sección, así como las proyecciones diarias y anuales asociadas, que evidentemente dependen de la potencia del electrolito, su demanda y el modelo tecnológico empleado. En otros estudios se ha estimado que un electrolizador de 60 MW requiere aproximadamente 389-386 m^3 de líquido diario (considerando una operación continua y óptima durante 24 horas), lo que equivale a 25.920-28.560 kg de H_2 generado. Suponiendo una carga del sistema del 60% a lo largo del año, esto se traduce en un consumo anual aproximado de 85.147-84.438 m^3 de agua y una producción de 5.677-6.255 toneladas de H_2.

El rango de cifras representa cálculos aproximados para sistemas de electrólisis alcalinos y PEM, respectivamente. Dichos cálculos no incluyen las mermas asociadas al abastecimiento de agua hacia el sistema, es decir, aquellas ocurridas durante las fases de obtención, traslado y acondicionamiento.

En la Tabla 4 se recopilan los procesos fundamentales para el procesamiento del agua que podrían requerirse, junto con sus requerimientos energéticos, disminuciones de agua y generación de desechos. La fase de desionización del procesamiento se considera una parte secreta del electrolizador, por lo que, no se describe en este lugar.

Tabla 3. Requerimientos unitarios para el agua.



Origen del recurso hídrico	Contaminantes comunes en el agua y criterios para su tratamiento	Aspectos clave de la calidad del agua	Requerimientos de procesos unitarios de tratamiento
Origen superficial	**Fuentes como ríos, arroyos y lagos. SST y DBO_5.**	**Calidad aceptable con un caudal abundante en el río más cercano, suficiente para garantizar suministro durante todo el año. En el Sitio A, sin embargo, el curso de agua puede secarse durante el verano.**	**Cribado fino, coagulación y filtración, seguido de bombeo por ósmosis inversa. Considera una elevación moderada de 20 metros y una distancia estimada de 10 kilómetros para evaluación.**
Fuentes provenientes de acuíferos	**Principalmente sólidos disueltos.**	**Generalmente de excelente calidad gracias a la filtración natural del suelo. Sin embargo, puede contener ciertos iones específicos, como carbonatos o metales (hierro y manganeso). En el Sitio A, los acuíferos disponibles representan una solución viable, aunque requieren permisos. En el Sitio B, se debe confirmar la disponibilidad de agua subterránea.**	**Dependiendo de la composición del agua, podría requerirse la remoción de algunos iones, lo cual se puede realizar a través de ósmosis inversa. La gestión de permisos conlleva un costo anual aproximado de 750 €, y los gastos de bombeo pueden ser significativos, considerando una altura neta de aspiración de 200 metros.**
Efluentes provenientes de procesos industriales	**Varían según el tipo de industria, incluyendo sólidos suspendidos, DBO_5, DQO y posibles niveles de toxicidad.**	**Depende de la naturaleza de la industria. Puede contener contaminación orgánica o carecer de ella. Además, garantizar un caudal constante durante todo el año puede representar un desafío.**	**Tratamiento avanzado, como coagulación y filtración, seguido de ósmosis inversa.**



Aguas urbanas tratadas	**Efluentes derivados de sistemas de alcantarillado en áreas urbanas. Incluyen sólidos suspendidos, DBO_5, DQO y posibles trazas de toxicidad.**	**El tratamiento suele ser secundario o secundario con eliminación de nutrientes. Sin embargo, podría requerirse un pretratamiento terciario adicional, como coagulación y filtración, antes de someterla a ósmosis inversa.**	**Implementación de un tratamiento avanzado que combine coagulación y filtración, seguido de ósmosis inversa.**
Agua marina	**Recurso hídrico proveniente del mar.**	**Alta salinidad, con una concentración de 36–37‰, y un contenido significativo de sólidos disueltos, como cloruros y sulfatos. El agua de mar es utilizada principalmente cuando no se dispone de otras fuentes. Aunque es abundante y fácilmente accesible en zonas costeras, las distancias largas o las elevaciones pueden representar un desafío logístico y económico.**	**Incluyen tamizado fino para eliminar partículas grandes y el uso de membranas para desalinización mediante ósmosis inversa. El bombeo puede requerir costos significativos debido a la altura o distancia de transporte.**
Agua de estuarios	**Alta salinidad, con niveles de 33–34‰, además de algas y sólidos suspendidos.**	**El agua de los estuarios se caracteriza por una composición variable debido a las fluctuaciones de las mareas, lo que puede complicar la captación y aumentar los costos asociados.**	**Incluyen cribado fino para eliminar partículas grandes y membranas de desalinización mediante ósmosis inversa. Los costos pueden incrementarse debido a la elevación y distancia necesarias para el bombeo.**
Red de suministro de agua	**Recurso proveniente de sistemas de distribución gestionados por empresas de abastecimiento. Principalmente sólidos disueltos.**	**Generalmente, el agua es de buena calidad, aunque su disponibilidad puede estar condicionada por los términos del contrato con la empresa suministradora.**	**Uso de ósmosis inversa para mejorar la calidad del agua. Sin embargo, la cantidad solicitada podría superar la capacidad de suministro disponible.**



Agua pluvial	**Recurso hídrico captado directamente de la lluvia. Pequeñas concentraciones de sólidos disueltos, DBO_5 y SST.**	**Generalmente es de buena calidad, aunque puede contener compuestos adquiridos por la absorción de gases atmosféricos o por contacto con el suelo durante el drenaje. Para garantizar disponibilidad durante todo el año, se requiere un sistema de almacenamiento adecuado. En el Sitio B, su uso podría combinarse con actividades agrícolas para optimizar costos.**	**Incluyen filtración fina para eliminar partículas pequeñas, seguida de ósmosis inversa. También es necesario contar con almacenamiento y un sistema de bombeo.**

Notas: La DBO_5, o demanda bioquímica de oxígeno, es un parámetro utilizado para medir de forma indirecta el nivel de contaminación orgánica presente en el agua. Por su parte, la DQO, o demanda química de oxígeno, sirve como un indicador indirecto de la cantidad de materia orgánica en el agua. Finalmente, los SST se refieren a los sólidos suspendidos totales presentes en el líquido.

Tabla 4. Opciones de tratamiento unitario de agua, consumo energético, pérdidas asociadas y generación de residuos durante el proceso.

Procesos unitarios de tratamiento	Descripción de las operaciones	Requerimientos de energía	Pérdidas hídricas durante el tratamiento	Generación de subproductos y residuos
Cribado fino	Técnica empleada para retener los sólidos presentes en el agua residual que ingresa a la planta de tratamiento. Su	Requiere entre 0.5-1.5 Wh/m^3	Consideradas insignificantes.	Principalmente lodos húmedos.



	objetivo principal es remover materiales sólidos mediante tamices con aberturas que típicamente varían entre 1.5 y 6 mm.			
Coagulación-floculación y filtración	Proceso común en el tratamiento de agua diseñado para eliminar partículas y reducir la turbidez. Consiste en la adición de un coagulante, típicamente sales de hierro o aluminio combinadas con materiales poliméricos, que se mezclan con el agua a tratar. El coagulante se adhiere a las impurezas, formando flóculos más grandes que son posteriormente eliminados mediante filtración, utilizando medios como arena, carbón antracita o una combinación de ambos	Inferior a 0.05 kWh/m^3	Consideradas insignificantes.	Principalmente lodos húmedos.
Ultrafiltración	Tecnología que utiliza membranas como una alternativa eficiente y compacta para el tratamiento de agua. Destaca por sus menores requisitos de	Rango entre 0.025 y 0.1 kWh/m^3	Aproximadamente **10%**.	Generación de un lodo concentrado salino equivalente al **7%** del volumen de agua de entrada.



	mantenimiento, reducción en la generación de residuos y costos operativos más bajos en comparación con otros métodos			
Ósmosis inversa	Método que utiliza una membrana semipermeable para remover iones, moléculas no deseadas y partículas grandes del agua. Este proceso requiere aplicar presión para superar la presión osmótica, generada por las diferencias en el potencial químico del disolvente. Una planta de gran capacidad puede tratar al menos **10,000 m³/día**.	Oscila entre 3 y 6 kWh/m^3	• 15–25% en aguas subterráneas. • 20–30% en aguas residuales. • 35–40% en agua de mar.	• 14% de aguas subterráneas como rechazo. • 21% de aguas residuales como rechazo. • Producción de concentrado de salmuera, una solución altamente salina con sólidos disueltos.

En la figura 21 se representan los pasos requeridos para llevar agua al electrolizador, desde su obtención hasta su utilización, considerando todas las potenciales alternativas de agua. En este esquema, las áreas punteadas señalan los procedimientos que podrían resultar prescindibles según las particularidades propias de la fuente hídrica a emplear (es decir, las cualidades del agua subterránea y del agua superficial difieren incluso dentro de un mismo país).

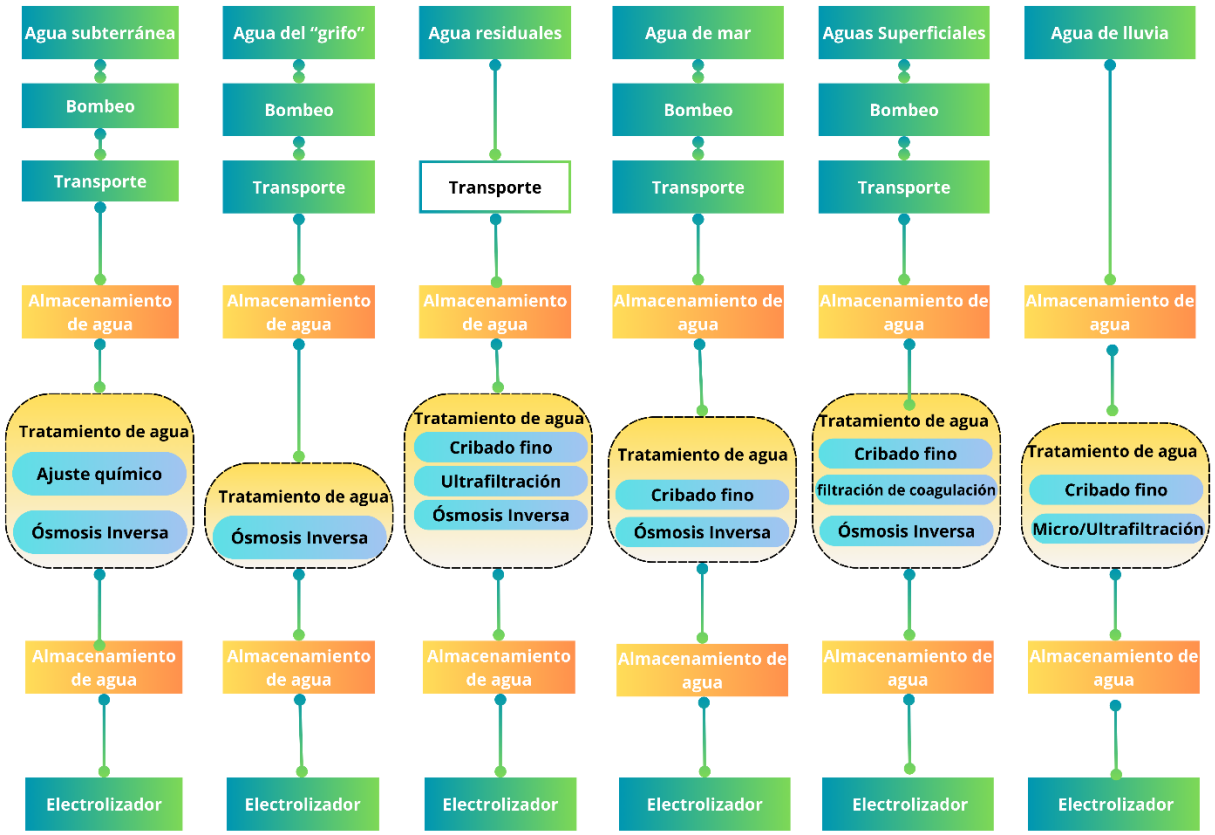


Figura 21. Etapa de recolección de agua de una fuente prometedora, con las medidas de procesamiento requeridas.

El requerimiento total de agua para un electrolizador equivale aproximadamente al 85% adicional del agua necesaria para cumplir con la estequiometría de la reacción de electrólisis. Este cálculo incluye diversas pérdidas: un 5% en la extracción o recolección del agua, un 10% durante el transporte, entre un 15% y un 40% dependiendo del tipo de



tratamiento aplicado, un 10% debido a evaporaciones o fugas en la entrada del electrolizador, un 25% adicional destinado a tareas de limpieza, y un 10% extra como medida preventiva para reducir los riesgos asociados con la escasez de agua.

La organización de las actividades relacionadas con el acondicionamiento del agua puede cambiar según quién sea responsable de las distintas etapas del proceso. Existen diversas alternativas sobre qué fases del acondicionamiento pueden desarrollarse dentro o fuera de la planta de depuración de aguas residuales (PTAR). Estas variantes dependen tanto del esquema comercial implementado como del interés de las compañías especializadas en el tratamiento del agua, como se detalla en la figura 22.



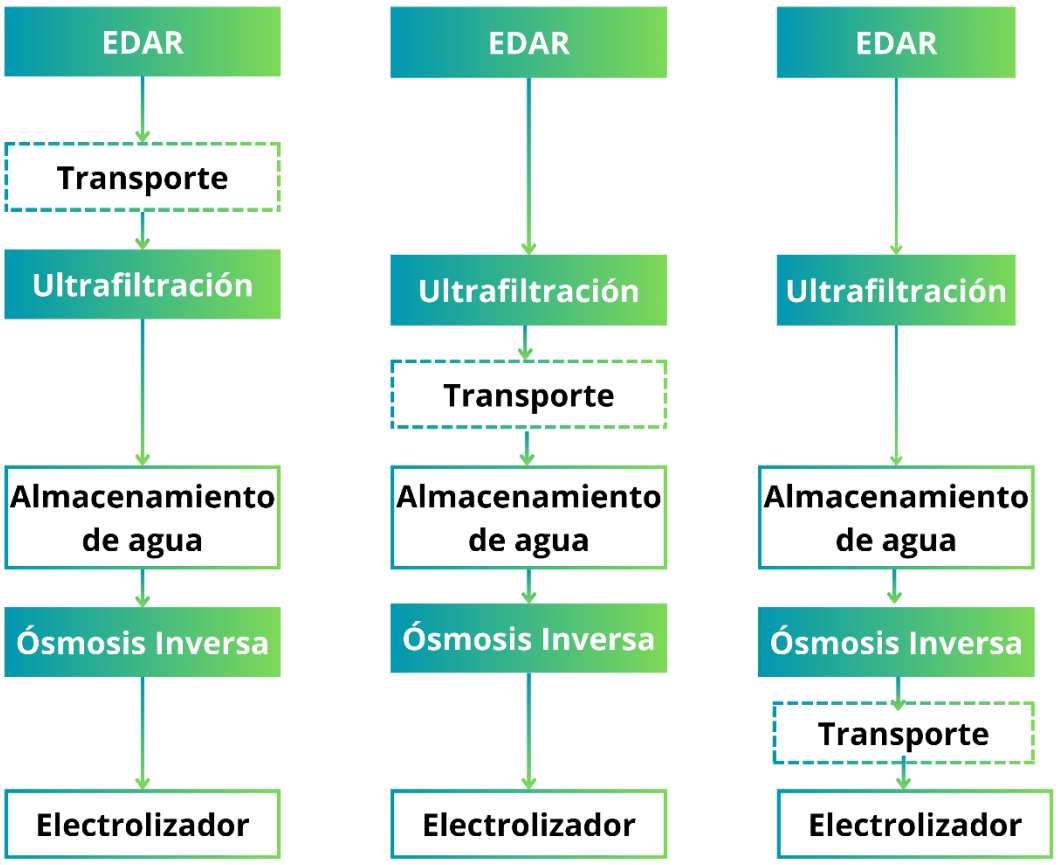


Figura 22. Evaluación preliminar de la viabilidad del agua marina de Cartagena para procesos de electrólisis.

3.1.3. Calidad del desempeño de los recursos hídricos en el proceso de electrólisis.

Se realizó una evaluación cualitativa de cada una de las posibles fuentes de agua (Tabla 1) en función de su capacidad para abastecer las necesidades de producción de hidrógeno. Este



análisis adoptó un enfoque basado en el valor funcional, donde la función principal era garantizar un suministro adecuado de agua. Para llevar a cabo esta evaluación, se definieron los siguientes criterios:

a) Estabilidad de disponibilidad inmediata: Impacto de factores climáticos, como sequías, en la capacidad de la fuente de agua para abastecerse a corto plazo.

b) Confiabilidad futura de las fuentes: Evaluación de cómo el cambio climático y otros factores pueden influir en la sostenibilidad de la fuente de agua y la obtención de permisos ambientales.

c) Continuidad en el suministro: Posibilidad de interrupciones no climáticas, como mantenimientos programados, que puedan comprometer el flujo constante de agua.

d) Conflictos por uso compartido: Competencia con otras actividades o industrias que puedan demandar el agua en el punto de captación o recolección.

e) Simplicidad en la captación o recolección: Número de actores involucrados y disponibilidad de experiencia previa para el uso de la fuente en aplicaciones similares.

f) Proximidad a la planta: Distancia desde la fuente de agua hasta las instalaciones de producción de hidrógeno y su impacto logístico.

g) Procesos de acondicionamiento requeridos: Nivel de tratamiento necesario para adaptar el agua a los requisitos del electrolizador.

h) Aceptación pública: Grado de respaldo o rechazo social hacia el uso de esta fuente de agua.

i) Facilidad en la obtención de permisos: Número de organismos necesarios para aprobar el uso y transporte del agua, junto con antecedentes en procesos similares.



3.2. Descripción De Las Pruebas, Estudios o Simulaciones Llevadas A Cabo Para Evaluar Las Innovaciones Tecnológicas.

Actualmente, el agua dulce de elevada pureza se emplea en electrolizadores comerciales para generar H_2 verde. No obstante, este recurso es limitado en numerosas regiones, y más del 80% de la población mundial afronta altos niveles de riesgo en cuanto a la seguridad hídrica (Vörösmarty et al., 2010). A diferencia del agua dulce, el agua de mar es casi infinita: representa alrededor del 71% de la superficie de la Tierra y contiene más del 96% de toda el agua del planeta. Las regiones costeras áridas, como el Medio Oriente, Sudáfrica, la costa oeste de América y las zonas costeras de Australia, experimentan una notable escasez de agua dulce. En cambio, estas zonas están repletas de suministros acuáticos y poseen considerables recursos solares y eólicos (Dresp et al., 2019). Así pues, es considerablemente viable emplear el sobrante de energía ecológica para separar el agua marina en H_2 en áreas estériles situadas próximas a litorales marinos.

Hasta ahora, se han establecido como las dos vías predominantes para la generación de hidrógeno verde, la electrólisis de agua marina ya sea mediante un proceso único o en dos etapas (ver figura 23). Varios científicos sostienen que es imprescindible emplear de manera directa la electrólisis del agua marina para generar H_2, y que es esencial crear un electrolizador capaz de utilizar agua marina como recurso primario (Dresp et al., 2019; Farràs



et al., 2021; Tong et al., 2020). Los detractores más sólidos de esta postura sostienen que el estudio de la separación directa del agua marina no tiene sentido desde la perspectiva del balance de costos y ventajas (Hausmann et al., 2021; Khan et al., 2021). Con base en la eficacia y los gastos presentes de la técnica de ósmosis inversa, se determina que los gastos de inversión y funcionamiento de la limpieza inicial del agua marina representan únicamente una pequeña parte de los costos de electrólisis del agua marina. Al tomar en cuenta la tecnología presente de limpieza en pequeñas cantidades de agua marina mediante ósmosis inversa, el gasto de dicha limpieza constituye, de hecho, una porción mínima del valor del hidrógeno verde (<0.1 $ por kg de H_2) (Khan et al., 2021).

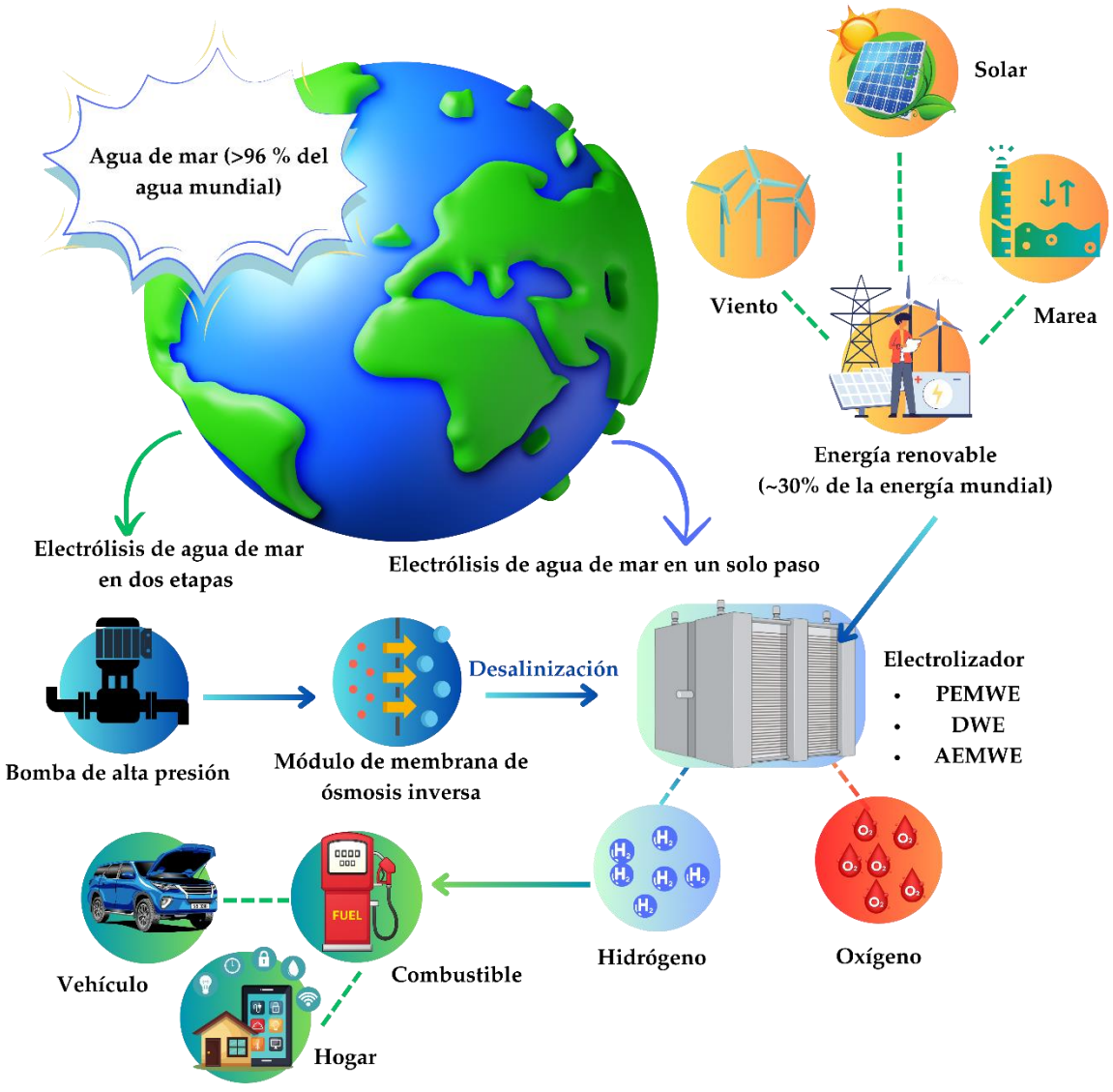


Figura 23. Estudio comparativo de la eficiencia de diferentes electrodos en condiciones marina.

No obstante, cuando se analiza el costo del uso masivo de la tecnología de ósmosis inversa junto con energías renovables para purificar agua de mar, se espera que los costos aumenten. En este contexto, se ha calculado que la desalinización del agua de mar puede



llegar a costar entre 4 y 11 USD por metro cúbico, mientras que la producción de hidrógeno verde rondaría los 12.1 USD por kilogramo (Hausmann et al., 2021). Es importante destacar que reducir los gastos asociados al pretratamiento del agua, sin sacrificar el rendimiento de las celdas electrolíticas ni su vida útil, permitirá también reducir los costos operativos del proceso de electrólisis de agua de mar. En este sentido, el desarrollo de tecnologías que permitan utilizar agua con una pureza inferior a la del agua ultrapura como fuente, impulsará significativamente la comercialización de la electrólisis de agua de mar.

3.2.1. Retos y Oportunidades en la Electrólisis del Agua de Mar

El mayor desafío de realizar la electrólisis del agua de mar radica en la complejidad de sus componentes, que incluyen microorganismos, sedimentos y diversas especies iónicas que complican el proceso. La estructura del agua de mar varía, no es constante, y factores como la ubicación geográfica y las estaciones del año influyen en sus características físicas y químicas. Los sedimentos y microbios presentes suelen complicar el mantenimiento de los electrolizadores, aunque pueden ser eliminados en gran medida a través de un pretratamiento adecuado. No obstante, el agua de mar contiene una variedad de iones (como CO_3^{2-}, SO_4^{2-}, Br^-, F^-, Cl^-, Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Cu^{2+}, Sr^{2+}, Cd^{2+} y HCO_3^-) que no pueden ser eliminados fácilmente mediante filtración (F. Y. Gao et al., 2022). Es fundamental tener en cuenta la presencia de estos iones al llevar a cabo la electrólisis del agua de mar. Por ello, un enfoque integral y viable para este proceso debe abordar y solucionar los siguientes desafíos:



Los iones metálicos, particularmente los metales pesados, se acumulan en la superficie del cátodo, lo que puede inactivar el electrodo. Además, los iones de cloruro (Cl^-) en el agua de mar interfieren con la reacción de evolución de oxígeno (OER), y el cloro (Cl_2) generado deteriora gravemente el electrolizador. A su vez, dado que hay pocos iones tampón en el agua de mar, es difícil controlar el pH cuando se trabaja con altas densidades de corriente (F. Y. Gao et al., 2022).

El desafío más importante en la electrólisis del agua salina para HER surge cuando, conforme se incrementa la corriente, el pH local próximo al cátodo se eleva rápidamente. Esto provoca que los cationes presentes en el agua salina precipiten, formando compuestos como $Ca(OH)_2$ y $Mg(OH)_2$, lo que obstruye los sitios activos de la HER y dificulta el proceso.

Para garantizar una electrólisis sostenible del agua de mar a largo plazo, es crucial resolver el desafío de las fluctuaciones significativas del pH. Hoy en día, se plantean dos alternativas: (i) incorporar un tampón de pH al proceso de electrólisis para controlar estas variaciones, o (ii) desarrollar electrolizadores especializados que permitan separar eficientemente los sedimentos que se acumulan en la zona del cátodo. Por otra parte, ciertos metales disueltos en el agua salina, como Cu^{2+}, Cd^{2+} y Pb^{2+}, tienden a acumularse en la zona del cátodo cuando se alcanzan ciertos potenciales, lo que no solo interfiere con HER, sino que además afecta gravemente la vida útil del electrodo. Por ello, la creación de nuevos catalizadores deberá enfocarse en evitar estos fenómenos electroquímicos indeseados,



garantizando así una mayor eficiencia para la HER durante la electrólisis del agua salada. El agua salina contiene una elevada concentración de iones negativos que son electroquímicamente activos, como Cl^- y Br^-. Desafortunadamente, la química del cloro es muy probable que rivalice con la evolución de oxígeno en el ánodo, dado su valor de oxidación/reducción estándar, que oscila entre 0.9 y 1.6 V en relación con el electrodo de referencia de hidrógeno (SHE) (F. Y. Gao et al., 2022).

3.3. Detalles Sobre Las Herramientas Y Tecnologías Empleadas en este proyecto (Modelos Computacionales, Pruebas En Laboratorio, Entre Otros).

El desarrollo de este proyecto se fundamenta en un estudio reciente realizado por (Xie et al., 2022). Su estrategia radicó en la incorporación de un sistema de purificación de agua realizado in situ, que se basa en un proceso de cambio de fase autoalimentado durante la electrólisis del agua salina. Este proceso se lleva a cabo utilizando una membrana hermética y translúcida fabricada con politetrafluoroetileno (PTFE) poroso y repelente al agua, que actúa como interfaz de comunicación para el transporte de gases, además de emplear una solución densa de hidróxido de potasio (KOH) como electrolito autoamortiguador (SDE).



3.3.1. Metodología empleada en este proyecto

3.3.1.1. Obtención De Hidrógeno Verde Usando Membranas De PTFE.

Los materiales necesarios para llevar a cabo la electrólisis del agua de mar basado en membranas para producir hidrógeno son los siguientes:

Tabla 5. Reactivos estudio 1.

Reactivos	Pureza	Vendedor
KOH	>90%	Sigma Aldrich
Ácido sulfúrico	96%	Merck Millipore
NaCl	99.5%	Thermo Scientific Chemicals
N, N´-metilenbisacrilamida (MBA)	99%	Sigma Aldrich
Ácido 2-acrilamida-2-metilpropanosulfónico (AMPS)	98%	Thermo Scientific Chemicals
Persulfato de amonio (APS)	98%	Thermo Scientific Chemicals
Alcohol polivinílico 1799	-	Kelong
$Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$	99%	Thermo Scientific Chemicals
CH_4N_2S (Tiourea)	99%	Thermo Scientific Chemicals
$Ni(CH_3COO)_2 \cdot 4H_2O$	98%	Sigma Aldrich
Catalizador comercial poroso MoNi/NF (apertura de 85 ppi, densidad de área de 450 gm^{-2})	-	Kunshan Guangjiayuan Electronic Materials
Catalizador comercial de malla PtNi	-	Luzhou Hongjiang Electrolytic Equipment
	0.1 µm	JCMSC



Membranas porosas de PTFE con diferentes tamaños de poros	0.45 µm 1 µm 3 µm 5 µm	Hunan Lujing Environmental Technology

3.3.1.2. Preparación De SDE Higroscópicas A Partir De PAMPS Y PVA/KOH.

El SDE higroscópico de PAMPS se obtendrá a través de una polimerización por radicales libres. Para ello, se preparará una solución precursora disolviendo en agua desionizada cantidades estequiométricas de AMPS, MBA y APS. Posteriormente, esta mezcla se someterá a una burbujeo con gas nitrógeno durante un mínimo de 10 minutos. A continuación, la solución precursora será transferida a un reactor de PTFE, manteniéndolo a temperatura ambiente durante 24 horas para permitir que la reacción se complete. El SDE higroscópico de PAMPS obtenido se enjuagará con agua pura para eliminar cualquier residuo remanente y luego se sumergirá en polietilenglicol para extraer el agua. Posteriormente, este SDE se utilizará en la generación de hidrógeno (H_2).

Para preparar el PVA/KOH, se creará una solución al 10% en peso de PVA al dispersar PVA 1799 en agua desmineralizada, aplicando agitación intensa y calentando a 70 °C. Esta solución precursora de PVA al 10% se transferirá a un contenedor de PTFE, el cual será enfriado a -20 °C. Posteriormente, la mezcla congelada de PVA se sumergirá en una solución



al 40% en peso de KOH durante un máximo de 24 horas. De este modo, se obtendrá el SDE higroscópico de PVA/KOH. Durante la generación de hidrógeno (H_2), se utilizará el PVA/KOH para facilitar la licuefacción del vapor de agua y la migración de iones OH^-.

3.3.1.3. Preparación Del Electrocatalizador Anódico Mo-Ni_3S_2/NF.

El electrocatalizador de ánodo Mo-Ni_3S_2/NF, se fabricará en el laboratorio, siguiendo el estudio realizado por (Xie et al., 2022). En una preparación estándar, se combinará $Ni(CH_3COO)_2 \cdot 4H_2O$ (1 mmol), $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$ (1 mmol), CH_4N_2S (3 mmol) y 15 ml de agua desionizada, manteniendo una agitación constante hasta lograr su disolución completa. Posteriormente, la mezcla obtenida y las espumas de níquel se introducirán en un autoclave de acero inoxidable recubierto con teflón y se mantendrá a 160 °C durante 6 horas. Tras enfriarse hasta alcanzar la temperatura ambiente, se recogerán las muestras del electrocatalizador, y se lavarán varias veces con agua desionizada y etanol, para luego secarlas al vacío a 60 °C por algunas horas.

3.3.1.4. Análisis De La Concentración De Iones: Caracterización Y Evaluación

Se determinarán las concentraciones de Cl^-, SO_4^{2-} y Mg^{2+} en muestras de agua de mar y en el electrolito de soporte (SDE) utilizando técnicas de cromatografía iónica (Thermo



Scientific ICS 100) y espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (PE Avio 200). Para medir la concentración de hipoclorito (ClO^-) en el SDE, se aplicará el método de o-tolidina, basado en una reacción de óxido-reducción entre el hipoclorito y la o-tolidina. La solución utilizada debe contener 0.5 mmol de o-tolidina disuelto en agua desionizada. Se preparará una curva de calibración agregando diferentes concentraciones de ClO^- (0, 6, 12, 24, 36 y 60 µM) en soluciones de KOH (0.1 ml), las cuales se inyectarán en la solución de prueba. Los espectros de absorbancia ultravioleta-visible se medirán a una longitud de onda de 436 nm para establecer una relación entre la absorbancia y la concentración de ClO^-. Tras un período prolongado de electrólisis, se añadirá una muestra de SDE (0.1 ml) a la solución de prueba, y la concentración de ClO^- se determinará comparando el espectro obtenido con la curva de calibración.

3.3.1.5. Evaluación Del Desempeño Del Proceso De Electrólisis

Inicialmente, se prepararán soluciones de electrolito de soporte de KOH (SDE) con distintas concentraciones en peso (10%, 20%, 30%, 40% y 50%). La conductividad de cada solución se evaluará utilizando un conductímetro con electrodos de platino a temperatura ambiente. Las características electrocatalíticas de los electrocatalizadores se analizarán mediante una estación de trabajo electroquímica (CHI660, CH Instruments). Se llevarán a cabo experimentos de voltamperometría de barrido lineal y voltamperometría cíclica en un rango



de 0 V a 2.7 V, mientras se mantiene el flujo continuo de gas nitrógeno en el electrolito para eliminar el oxígeno disuelto. Los voltamperogramas de barrido lineal del sistema electrolítico a escala de laboratorio y del sistema ampliado se obtendrán usando un multímetro. Los voltajes entre el ánodo y el cátodo se registrarán para diferentes densidades de corriente: 0 mA/cm², 10 mA/cm², 50 mA/cm², 100 mA/cm², 150 mA/cm², 200 mA/cm² y 250 mA/cm².

3.3.1.6. Configuración Del Sistema Electrolítico De Soporte (SES) A Escala De Laboratorio

El sistema electrolítico de soporte (SES) en formato experimental presenta una estructura simétrica, en la que cada extremo incluye una capa catalítica, un electrodo, un compartimento para almacenar el electrolito de soporte (SDE) y un contenedor externo (Observar la figura 24). Ambas secciones están separadas por un diafragma que permite dividir el hidrógeno (H_2) del oxígeno (O_2). Se usarán catalizadores comerciales de malla porosa de MoNi/NF para el ánodo y PtNi para el cátodo, ambos con un espesor cercano a 1 mm.

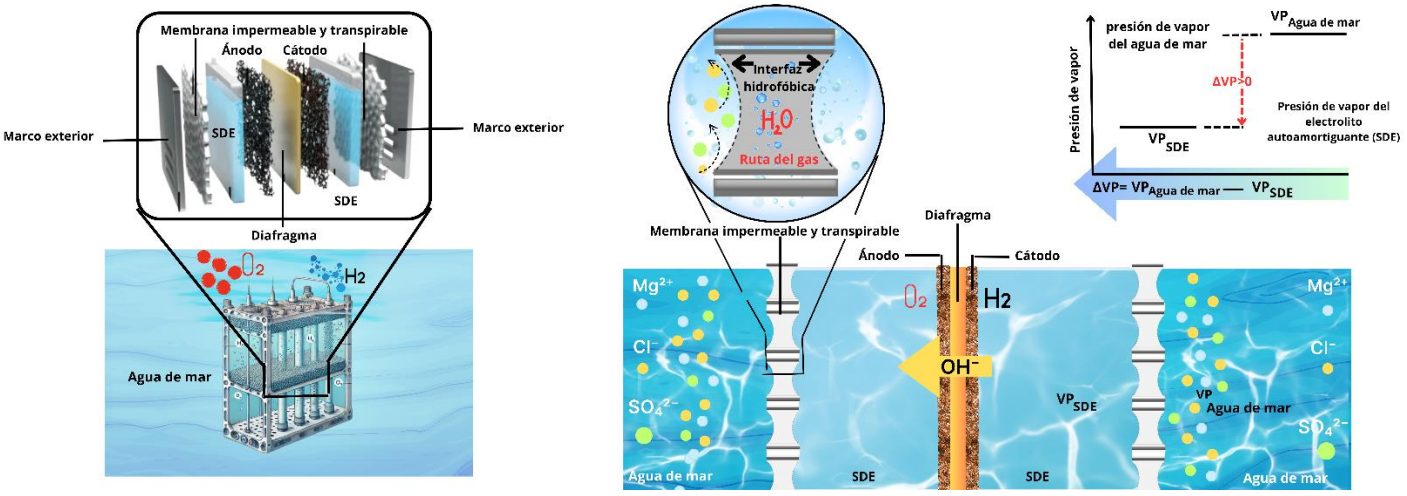


Figura 24. Diagrama ilustrativo de un sistema electrolítico de soporte (SES) estándar y explicación del mecanismo de migración, que se basa en la transformación de las fases líquido-gas-líquido durante el proceso de purificación del agua y la fuerza que impulsa su movimiento.

3.3.1.7. Evaluación De La Durabilidad Del Proceso De Electrólisis

Se llevarán a cabo ensayos de resistencia para la electrólisis de agua de mar utilizando una fuente de alimentación (ITECH, IT6900A) que opera a densidades de corriente constantes de 250 mA/cm² o 400 mA/cm². Como resultado final, se monitoreará el voltaje aplicado al electrolizador. La eficiencia de formación de oxígeno (RFE) se determinará mediante la cantidad de O_2 generada, medida a través de cromatografía de gases. Durante el experimento, se utilizará una estación de trabajo electroquímica para mantener una producción continua



de O_2 bajo diferentes densidades de corriente. Se introducirá un flujo constante de nitrógeno en la cámara del ánodo, conectada al sistema de muestreo de gases de un cromatógrafo de gases (Shimadzu, GC-2014C). Un detector de conductividad térmica se empleará para detectar y cuantificar el volumen de O_2 generado. La RFE se definirá como la relación entre el oxígeno producido en un electrolito amortiguador de KOH y la cantidad de O_2 generada en un electrolizador alcalino estándar con electrolito de KOH.

3.3.2. Método de Electrólisis Directa de Agua de Mar Evitando la Corrosión

3.3.2.1. Selección y Tratamiento de Materiales No Metálicos

Se seleccionarán rocas porosas de origen superficial que poseen alta conectividad entre sus poros, lo que permitirá la conducción eléctrica cuando estén completamente saturadas de agua salina. Las rocas elegidas, presentarán diferentes niveles de porosidad y permeabilidad y serán sometidas a mediciones para garantizar su idoneidad. Posteriormente, las muestras se sumergirán en una solución de cloruro de sodio (NaCl) con una concentración de 35,000 ppm, replicando la salinidad del agua marina. Este proceso de inmersión durará 48 horas para asegurar que las rocas estén completamente saturadas y listas para su uso como ánodos no metálicos.



3.3.2.2. Configuración del Sistema de Electrólisis

El sistema de electrólisis se configurará utilizando una celda electroquímica estándar, donde el ánodo se sustituirá por una de las rocas tratadas y saturadas en solución salina, mientras que el cátodo continuará siendo metálico. La fuente de energía utilizada será una fuente de corriente continua ajustable que proporcionará una corriente de 1.0 amperios y un voltaje de 7.4V, parámetros típicos para este tipo de procesos.

3.3.2.3. Resultados Comparativos con Electrodos Metálicos

Antes de comenzar las pruebas con los electrodos de roca, se realizarán experimentos de referencia utilizando ánodos metálicos convencionales. Se espera, que estos experimentos revelen una rápida degradación de los electrodos debido a la corrosión, visible después de apenas unos minutos de funcionamiento. Mediante un análisis posterior con un microscopio electrónico de barrido, se detectarán depósitos de corrosión en el agua y en la superficie del ánodo, lo que demostrará la necesidad de utilizar materiales no metálicos.

3.3.2.4. Desempeño de los Electrodos No Metálicos

Las rocas porosas actuarán como electrodos en los experimentos, y se espera que ofrezcan una alternativa efectiva a los electrodos metálicos. Bajo las mismas condiciones de corriente y voltaje, los electrodos de roca no deberían mostrar signos de corrosión ni degradación, lo



que representará una ventaja significativa en términos de durabilidad. Los resultados anticipados indicarán que la capacidad de los electrodos no metálicos para arrastrar corriente dependerá de su porosidad; se espera que las muestras con mayor porosidad permitan un mayor flujo de corriente, comparándose favorablemente con los electrodos metálicos, pero sin los problemas de corrosión.

3.3.2.5. Optimización mediante Electrodos en Paralelo

Para maximizar la eficiencia del sistema, se implementará una configuración en paralelo con varios electrodos de roca. Este enfoque debería reducir la resistencia global del sistema y mejorar el rendimiento al incrementar la cantidad de corriente que se pueda arrastrar, sin aumentar la carga en cada electrodo individual. Este esquema modular se aplicará para hacer que el sistema sea fácil de escalar, lo cual será ideal para aplicaciones a gran escala.

3.3.2.6. Producción de Hidrógeno

El sistema será probado para evaluar su capacidad de producir hidrógeno. Se implementará una configuración de doble cámara en la que el gas hidrógeno desplazará agua, lo que permitirá medir el volumen generado. Con una corriente de 0.023 amperios y un voltaje de 1.8V, se anticipa que el sistema producirá aproximadamente 85 cc de hidrógeno en un lapso de 10 horas. Los electrodos no metálicos se evaluarán para confirmar que su rendimiento sea



comparable al de los metálicos, pero con la ventaja añadida de eliminar los problemas relacionados con la corrosión.



Adaptación A Las Condiciones Locales De Cartagena

4.1. Análisis De Los Desafíos Específicos Que Enfrenta Colombia (Climáticos, Económicos, Sociales).

En 2020, las autoridades de Colombia fijaron como meta limitar la emisión de gases responsables del calentamiento global a un tope de 169.44 millones de toneladas equivalentes de CO_2 para el año 2030. Este objetivo supone una disminución del 51% en relación con las proyecciones del escenario base del año 2010. Esta acción se enmarca dentro de la estrategia actualizada de la Aportación Nacionalmente Determinada para alcanzar los compromisos establecidos en el Acuerdo de París (*ACTUALIZACIÓN NDC COLOMBIA-2020 Actualización de La Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (NDC)*, n.d.). En respuesta a este desafío, el Ministerio de Minas y Energía dio a conocer la Hoja de Ruta Nacional del Hidrógeno (NHR). Esta iniciativa capitaliza la amplia disponibilidad de recursos naturales en Colombia y su ubicación estratégica, con puertos en el Atlántico y el Pacífico, con el fin de establecer al hidrógeno como un vector energético fundamental. Esta estrategia busca no solo facilitar la transición energética del país, sino también contribuir al abastecimiento de una porción de la demanda mundial de hidrógeno [6]. El gobierno colombiano prevé generar hidrógeno a partir de las industrias convencionales de petróleo y



carbón, incorporando tecnologías de captura de carbono, lo que se conoce como hidrógeno azul, en un horizonte de mediano plazo (Domínguez et al., 2022). No obstante, la Hoja de Ruta Nacional del Hidrógeno pone énfasis en la producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables como la energía solar, eólica y biomasa (H_2 verde), considerándolo el principal objetivo para alcanzar la transición energética.

De acuerdo con la Hoja de Ruta Nacional del Hidrógeno, se estima que la demanda de hidrógeno con emisiones reducidas en Colombia alcanzará 1850 kilotoneladas para 2050, enfocada en abastecer, sobre todo, las necesidades energéticas y de insumos de los sectores industrial y de transporte. La electrólisis, alimentada por fuentes solares y eólicas, se contempla como el método principal para la generación de hidrógeno. Para cumplir este objetivo, el país ha proyectado destinar 5.500 millones de dólares americanos (USD) antes del 2030 (Domínguez et al., 2022).

4.1.1. Visión General sobre el Crecimiento y las Oportunidades de la Economía del H_2 en Colombia.

La mayor parte del sistema eléctrico en Colombia se basa en fuentes renovables, con la generación a partir de recursos hídricos cubriendo cerca del 70% del total. Esto equivale a una capacidad instalada de alrededor de 12 GW. No obstante, la contribución de la energía solar y eólica es mínima, representando aproximadamente un 0.76% y un 0.10%, con



capacidades de 184 MW y 39.5 MW, en ese orden (Rodríguez-Fontalvo et al., 2024). Además, la producción de hidrógeno verde a gran escala en Colombia aún no ha despegado.

Hace poco, dos de las principales compañías de hidrocarburos del país instalaron dos instalaciones experimentales. Ambas operan utilizando energía solar captada por celdas fotovoltaicas y se encuentran en Cartagena, una ciudad en la región norte costera de Colombia. La capacidad de producción de hidrógeno en estas plantas fue de 20 kilogramos de H_2 diarios y 4 kilogramos de H_2 diarios, respectivamente (Rodríguez-Fontalvo et al., 2024). Hasta el momento, no se han registrado reportes sobre proyectos de generación de hidrógeno utilizando energía eólica. Sin embargo, se anticipa un aumento en la capacidad instalada de fuentes solares y eólicas en los próximos años. De acuerdo con el informe de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), para 2027 se espera la instalación de 16,650 MW en tecnología solar y 5,795 MW en energía eólica.

Estos progresos se fundamentan en las características favorables de algunas zonas del país, con un factor de rendimiento de hasta 22% en plantas solares a gran escala y 39% en proyectos eólicos (Pinilla et al., 2009). La energía eléctrica generada por estas instalaciones de recursos renovables puede ser empleada para abastecer electrolizadores en la fabricación de hidrógeno verde (ver Figura 25). Asimismo, la administración de Colombia ha expresado su deseo de fomentar innovaciones que permitan la valorización de residuos de biomasa derivados de diversos orígenes para la obtención de hidrógeno. Recientemente, el Ministerio

de Ciencia, Tecnología e Innovación, el Ministerio de Minas y Energía, y Ecopetrol, la principal compañía de hidrocarburos del país, iniciaron una convocatoria para propuestas con el objetivo de impulsar el avance tecnológico en la generación de H_2 a partir de biomasa.

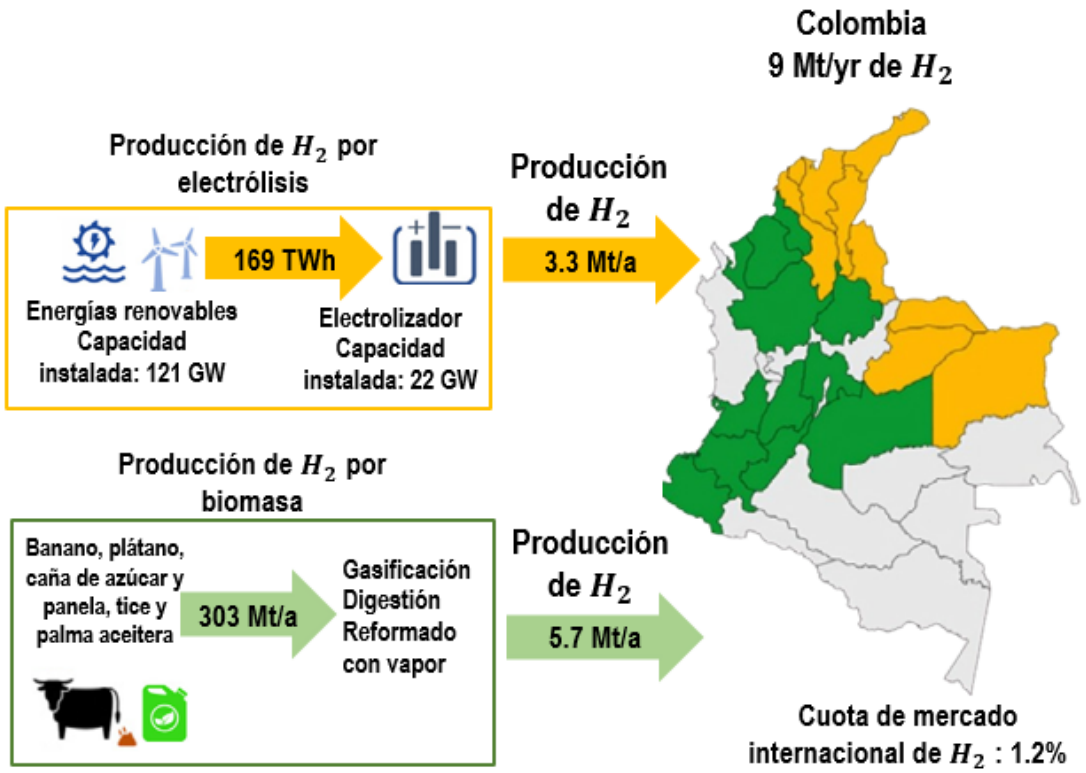


Figura 25. Análisis de la eficiencia de un electrolizador en condiciones locales de Cartagena.

La invitación descartó de manera explícita la generación de H_2 mediante electrolizadores, puesto que estos dispositivos requieren con gran parte metales preciosos, lo que incrementa los costos de inversión y no están accesibles con facilidad en el país (Rodríguez-Fontalvo et al., 2024). La biomasa sobrante puede ser transformada a través de

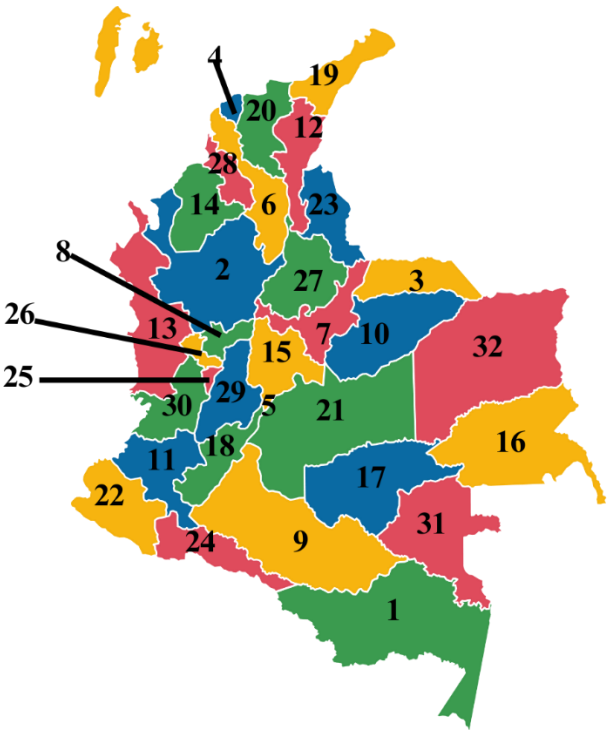


métodos termoquímicos y biológicos. La combustión, la pirólisis y la gasificación son las técnicas termoquímicas más analizadas. A través de estos métodos, se produce un gas de combustión que puede ser utilizado para generar calor, energía eléctrica o una corriente gaseosa rica en H_2 y metano (CH_4). Por otro lado, los procesos biológicos más significativos son la digestión anaeróbica y la fermentación oscura, que generan principalmente CH_4 (Rau et al., n.d.). La ruta elegida se basa fundamentalmente en la estructura y características de la biomasa. La cantidad de desechos agrícolas generados en Colombia, en particular provenientes de cultivos de plátano, banano, arroz, caña de azúcar y panela, ha crecido a más de 72 millones de toneladas por año (*Atlas Del Potencial Energético de La Biomasa Residual En Colombia*, n.d.).

4.1.2. Generación de H_2 mediante Electrólisis.

La energía solar fotovoltaica (SPV) y la energía eólica, tanto terrestre (WON) como marina (WOF), se han identificado como opciones viables para la electrólisis destinada a la generación de H_2. Dado que estas soluciones de fuentes sostenibles requieren grandes extensiones de terreno, el espacio disponible S_T en cada región se considera un factor importante y se determinó restando las áreas urbanas y conservadas del total de cada zona (Tabla 6). La Figura 26 ilustra las áreas del Gobierno. La información fue obtenida del estudio realizado por (Rodríguez-Fontalvo et al., 2024), quiénes tomaron la información de las bases de datos del DANE y del Registro Único de Áreas Protegidas (RUNAP).





1. Amazonas
2. Antioquia
3. Arauca
4. Atlántico
5. Bogotá
6. Bolívar
7. Boyacá
8. Caldas
9. Caquetá
10. Casanare
11. Cauca
12. Cesar
13. Chocó
14. Córdoba
15. Cundimarca
16. Guainía
17. Guaviare
18. Huila
19. La Guajira
20. Magdalena
21. Meta
22. Nariño
23. Norte de Santander
24. Putumayo
25. Quindío
26. Risaralda
27. Santander
28. Sucre
29. Tolima
30. Valle del Cauca
31. Vaupés
32. Vichada

Figura 26. Áreas del gobierno colombiano.

Tabla 6. Superficie accesible según las divisiones políticas de Colombia.

Región	S_T (km^2)	Región	S_T (km^2)	Región	S_T (km^2)	Región	S_T (km^2)
1	63,491	9	20,596	17	16,385	25	859
2	45,758	10	40,988	18	8998	26	1669
3	13,493	11	25,500	19	14,275	27	14,079
4	2933	12	18,683	20	15,755	28	10,097
5	1078	13	40,392	21	61,851	29	18,117
6	26,314	14	12,100	22	27,138	30	8880
7	15,339	15	17,130	23	15,615	31	41,801



8	6570	16	49,350	24	16,155	32	88,129

Se estimó que para el año 2050, Colombia podría producir hasta 3.3 millones de toneladas anuales (Mt/a) de hidrógeno mediante electrólisis, lo que contribuiría a satisfacer la demanda interna proyectada de 1.85 Mt/a. Además, se identificó que el excedente de producción, que alcanzaría los 7.15 Mt/a, podría ser exportado, representando aproximadamente el 1.2% de la demanda internacional esperada para ese año en el escenario de 1.5 °C de IRENA.

Sin embargo, para alcanzar esta capacidad de producción, se requiere una inversión total de aproximadamente 138 mil millones de USD y la purificación de 36 millones de toneladas de agua. Esto implica que el desarrollo de la infraestructura necesaria y la gestión de recursos hídricos son desafíos importantes a considerar para la implementación de la producción de hidrógeno verde mediante electrólisis en Colombia.

4.2. Propuesta De Adaptaciones O Ajustes Tecnológicos Necesarios Para Implementar Las Innovaciones En Cartagena.

La implementación de la producción de H_2 verde a partir de electrólisis directa de agua salina en Cartagena, utilizando membranas de PTFE, requiere una serie de adaptaciones tecnológicas clave para garantizar un rendimiento eficiente y sostenible. A continuación, se



presentan los ajustes necesarios, acompañados de una evaluación del entorno local de Cartagena, así como los retos y oportunidades que esta tecnología ofrece para la región.

4.2.1. Membranas de PTFE para la Electrólisis Directa.

Una de las innovaciones más relevantes es el uso de membranas de PTFE, las cuales permiten la migración selectiva de vapor de agua sin la penetración de iones e impurezas. Esta tecnología evita la corrosión y las reacciones secundarias que ocurren típicamente en los procesos de electrólisis directa con agua salina. Las membranas crean una ruta de difusión de gas que transporta vapor de agua desde el agua de mar hacia el electrolito autohumectante, lo que asegura una electrólisis continua y eficiente. Este diseño es fundamental para minimizar el desgaste de los electrodos y prolongar la vida útil del sistema en condiciones de operación a largo plazo.

4.2.2. Electrolito Autohumectante (SDE).

El uso de un electrolito autohumectante, como el KOH, es esencial para mantener el equilibrio entre la migración del vapor de agua y la electrólisis. Este electrolito no solo permite una electrólisis eficiente, sino que también actúa como un medio estable para evitar la acumulación de impurezas en el sistema. La combinación de la membrana de PTFE con el SDE facilita la generación de H_2 sin la necesidad de un proceso de desalinización previo, lo



cual reduce significativamente los costos operativos y mejora la flexibilidad del sistema, haciéndolo más adaptable a diversas condiciones ambientales.

4.2.3. Integración con Energías Renovables

La integración de esta tecnología con fuentes de energía renovable, como la energía solar, es un factor crucial para asegurar la sostenibilidad de la producción de H_2 verde. Cartagena presenta condiciones ideales para aprovechar la energía solar, debido a su ubicación geográfica y su alta irradiación solar anual. Esta ventaja reduce los costos energéticos y maximiza el impacto positivo en términos de sostenibilidad. Además, la proximidad de Cartagena al mar facilita el acceso a recursos hídricos para la electrólisis, lo que convierte a la ciudad en un lugar estratégico para la implementación de esta tecnología.



Figura 27. Energías Renovables en Cartagena, Colombia.



4.2.4. Retos y Oportunidades en Cartagena

A pesar de las oportunidades que ofrece Cartagena como un centro potencial de producción de hidrógeno verde, también existen varios retos. La corrosión y la contaminación del agua de mar, especialmente cerca de zonas industriales y puertos, podrían afectar el rendimiento del sistema. Es crucial implementar sistemas de monitoreo y mantenimiento periódico de las membranas para evitar el deterioro causado por contaminantes marinos. Sin embargo, las oportunidades de desarrollo económico y tecnológico son vastas. Cartagena podría posicionarse como un centro exportador de hidrógeno, aprovechando su infraestructura portuaria y su ubicación estratégica en la región del Caribe.



Resultados

5.1. Particularidades de la Electrólisis de Agua Marina

La fabricación industrial de H_2 y artículos relacionados a través de la electrólisis del agua salina es, teóricamente, factible y presenta amplias oportunidades como un proceso sostenible. La electrólisis del agua salina se fundamenta en los principios esenciales que rigen la electrólisis del agua dulce, aunque incluye varios adicionales por su mezcla química que contiene sales, entre ellas las que se presentan en la Tabla H. La finalidad de este proyecto es generar H_2 a partir de agua con sal, y hay tres métodos primordiales para conseguirlo:

1. Electrólisis para la generación de álcalis, H_2 y O_2.
2. Electrólisis para la obtención de álcalis, H_2, O_2. y cloro (Cl).
3. Electrólisis para producir hidrógeno e hipoclorito sódico (NaClO).

El enfoque más eficiente para la electrólisis del agua marina se manifiesta como el segundo. Considerando la amplia variedad de resultados deseados, el método en este contexto puede llevarse a cabo a precios razonables. Sin embargo, en esta situación, el cloro debe ser un producto secundario que se pueda liberar al entorno de forma segura. Una forma de lograr esto es transformando el cloro que se encuentra en los gases generados en el ánodo en hipoclorito. Este último compuesto, el hipoclorito, es un desinfectante habitualmente utilizado para tratamiento de agua potable o aguas residuales. Más de 60 compuestos están



disueltos en el agua salina, sin embargo, solo 6 de estos constituyen más del 99% de todos los sólidos disueltos; todos se hallan en forma de iones (Esmaeilion, 2020; Kucera, 2019). La mezcla predominante del agua marina se describe detalladamente en la Tabla 7.

Tabla 7. Mezcla predominante del agua marina (ppm) (Esmaeilion, 2020; Kucera, 2019).

Nombre	Sodio	Magnesio	Cloro	Calcio	Sulfatos	Sales disueltas
Formula	Na^{+}	Mg^{2+}	Cl^{-}	Ca^{2+}	$(SO_4)^{2-}$	SDT
Cantidad	10,752	1295	19,345	416	2710	35,000

Se calcula que el volumen total de sólidos en los que se fundamentan las formulaciones de agua marina sintética es aproximadamente de 35,000 ppm, de las cuales el NaCl constituye cerca de 30,000 ppm. Las aguas superficiales frecuentemente se encuentran en estado de saturación a causa del movimiento de las olas y la incidencia al CO_2 en la atmósfera, mientras que las aguas profundas del océano tienden a estar subsaturadas en relación con los carbonatos. Dicha saturación influirá en la precipitación de sales de calcio y magnesio durante el proceso de corrosión, tanto al implementar protección catódica como al electrolizar el agua marina.

A lo largo del proceso de electrólisis del agua marina, se forma en la cara del cátodo una delgada capa de depósitos de carbonato, principalmente compuesta por $CaCO_3$ y $Mg(OH)_2$. Los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} se depositan debido al incremento del pH local provocado



por la reacción HER en las proximidades de la cara del cátodo. Las acumulaciones de depósitos que se han formado continúan creciendo si no se remueven. La velocidad de crecimiento se intensifica a medida que se incrementa la temperatura del agua, se aumenta la mineralización del agua y se incrementa la velocidad de flujo. Los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} se transfieren más eficientemente hacia la superficie del cátodo cuando se incrementa la velocidad de flujo. Las acumulaciones terminan ocupando los espacios entre los electrodos, causando que estos queden totalmente obstruidos.

$$Ca^{2+} + OH^- + HCO_3{}^- \rightarrow CaCO_3 + H_2O \ (4)$$

$$Mg^{2+} + 2OH^- \rightarrow Mg(OH)_2 \ (5)$$

Los electrodos iniciales identificados por generar oxígeno durante la electrólisis del agua marina con un elevado grado de eficacia fueron los ánodos cubiertos con óxido de manganeso(Badea et al., n.d.; BADEA et al., 2007; Cojocaru et al., n.d.).

5.1.1. Evaluación Preliminar de la Viabilidad del Agua Marina de Cartagena para Procesos de Electrólisis

En este apartado se exponen los hallazgos preliminares que permitieron analizar la viabilidad de utilizar agua de las playas de Cartagena como fuente para los procesos de electrólisis en futuros proyectos de producción de hidrógeno verde. El estudio se enfocó en evaluar la aptitud de estas fuentes de agua en función de criterios cualitativos clave, como su desempeño frente a los requerimientos del proceso, además de estimar los costos asociados al suministro



y tratamiento del agua. Asimismo, se desarrolló un Indicador de Valor Sostenible, combinando los resultados de ambas evaluaciones, con el objetivo de determinar su viabilidad técnica y económica. Estos resultados iniciales sentaron las bases para confirmar la idoneidad del agua marina de Cartagena, lo que condujo a su selección como fuente primaria en los ensayos experimentales realizados posteriormente.

5.1.1.1. Evaluación Cualitativa del Desempeño de las Fuentes de Agua

En esta sección, se presentan los resultados del análisis preliminar para evaluar la viabilidad de las fuentes de agua en dos ubicaciones clave de Cartagena: **Sitio A**, representado por zonas semi-urbanas costeras como Bocagrande y Castillo Grande, y **Sitio B**, correspondiente a áreas rurales más alejadas del litoral, como Manzanillo del Mar y La Boquilla. Este enfoque permitió analizar cómo las características geográficas y ambientales de cada sitio afectan la disponibilidad, calidad y costos del agua para los procesos de electrólisis.

En el caso del Sitio A, aunque su proximidad al mar facilita el acceso al agua marina, la alta actividad turística y comercial puede comprometer la calidad del recurso. Además, estas zonas presentan desafíos en la gestión de residuos y el manejo de infraestructura hídrica, lo que podría influir en los costos de tratamiento necesarios para cumplir con los estándares del proceso de electrólisis.



Por su parte, el Sitio B enfrenta restricciones relacionadas con la distancia al mar, lo que aumenta la complejidad logística y los costos asociados con el transporte y tratamiento del agua. Sin embargo, estas áreas rurales podrían ofrecer un recurso hídrico menos afectado por contaminantes locales, mejorando la calidad inicial del agua disponible para los procesos.

Los resultados del análisis cualitativo se resumen en las Tablas 8A y B, utilizando un sistema de calificación de 1 a 4 puntos definido en la Tabla de los Anexos. Este análisis permitió identificar las fortalezas y limitaciones de cada sitio en términos de suministro hídrico, sentando las bases para las decisiones tomadas en el diseño del proyecto experimental.

Tabla 8A. Evaluación cualitativa del rendimiento de las fuentes de agua basado en criterios de análisis de valor seleccionados.

	Bocagrande							
Factores/Origen del recurso hídrico	**Fuentes superficiales: Cuerpos de agua como ríos, corrientes y lagos**	**Acuíferos subterráneos**	**Efluentes industriales tratados**	**Aguas urbanas residuales sometidas a tratamiento**	**Agua de mar**	**Aguas estuarinas**	**Sistemas de distribución de agua potable**	**Agua lluvia**
Confiabilidad en la disponibilidad a corto plazo (influencia climática).	1	2	2	4	4	2	1	1
Confiabilidad en la disponibilidad a largo plazo (impactos del clima).	1	2	3	4	4	1	1	1



Continuidad del suministro de agua (ausencia de interrupciones).	2	2	1	4	3	2	1	1
Competencia con otros usuarios para la extracción de agua.	1	1	4	4	4	3	4	4
Dificultad asociada a la extracción o recolección del recurso hídrico.	2	2	2	2	1	1	1	1
Longitud del transporte requerido desde la fuente.	3	3	2	2	2	1	2	4
Nivel de tratamiento requerido para el agua.	1	2	1	3	1	1	3	3
Complejidad del proceso de obtención de permisos.	2	1	4	4	1	1	3	3
Puntuación total acumulada.	13	15	19	27	20	12	16	18
Clasificación general en términos porcentuales.	**40.62%**	**46.87%**	**59.38%**	**84.37%**	**62.5%**	**37.5%**	**50%**	**56.3%**

Tabla 8B. Evaluación cualitativa del rendimiento de las fuentes de agua basado en criterios de análisis de valor seleccionados.

Manzanillo del Mar					
Factores/Origen del recurso hídrico	**Fuentes superficiales: Cuerpos de agua como ríos, corrientes y lagos**	**Acuíferos subterráneos**	**Efluentes industriales tratados**	**Aguas urbanas residuales sometidas a tratamiento**	**Agua lluvia**
Confiabilidad en la disponibilidad a corto plazo	3	2	2	4	1



(influencia climática).					
Confiabilidad en la disponibilidad a largo plazo (impactos del clima).	2	2	3	3	1
Continuidad del suministro de agua (ausencia de interrupciones).	3	2	1	2	1
Competencia con otros usuarios para la extracción de agua.	1	1	4	4	4
Dificultad asociada a la extracción o recolección del recurso hídrico.	2	2	3	3	1
Longitud del transporte requerido desde la fuente.	3	3	3	2	1
Nivel de tratamiento requerido para el agua.	3	2	1	3	3
Complejidad del proceso de obtención de permisos.	2	1	3	3	3
Puntuación total acumulada.	19	15	20	24	15
Clasificación general en términos porcentuales.	**52.78%**	**41.67%**	**55.56%**	**66.67%**	**41.67%**

En el análisis cualitativo realizado para las fuentes de agua disponibles en Bocagrande y Manzanillo del Mar, se observó que las aguas urbanas residuales sometidas a tratamiento presentaron el mejor desempeño en ambas ubicaciones, alcanzando un 84.37% en Bocagrande y un 66.67% en Manzanillo del Mar. Para Bocagrande, esta fuente fue seguida



por el agua de mar (62.5%) y los efluentes industriales tratados (59.38%), mientras que en Manzanillo del Mar, el orden de prioridad fue efluentes industriales tratados (55.56%) y fuentes superficiales como ríos, corrientes y lagos (52.78%). Por otro lado, las fuentes con menor desempeño en Bocagrande fueron las aguas estuarinas (37.5%) y el agua de lluvia (56.3%). En Manzanillo del Mar, las fuentes menos favorables fueron los acuíferos subterráneos y el agua de lluvia, ambas con un 41.67%.

El agua de mar presenta ventajas significativas como su alta disponibilidad, continuidad de suministro y proximidad en zonas costeras como Bocagrande y Manzanillo del Mar, lo que la hace una opción confiable para procesos industriales como la electrólisis. Además, su bajo nivel de competencia con otros usos la posiciona como una fuente sostenible. Sin embargo, enfrenta limitaciones importantes, como la necesidad de tratamientos complejos para reducir su salinidad y partículas, la posible complejidad en los permisos de extracción y su impacto potencial en ecosistemas marinos sensibles. Aunque muestra un buen desempeño general, el agua de mar es superada por las aguas residuales tratadas en eficiencia técnica y económica, lo que sugiere que, para maximizar su viabilidad, se deben abordar estos desafíos en su implementación.



5.2. Análisis Inicial y Caracterización Preliminar del Agua de Playa

En el presente informe, se seleccionaron exclusivamente las muestras recolectadas en las playas de Bocagrande, debido a su relevancia dentro del contexto del estudio. Aunque las actividades de muestreo abarcaron otras localidades costeras como La Boquilla, Manzanillo del Mar, Castillo Grande, la Bahía de Manga y Marbella, los datos obtenidos en estos sitios han sido compilados y analizados en detalle en el documento titulado *"Metodologías para la Medición y Mitigación de Impurezas en Electrólisis de Agua de Mar"*, elaborado como parte del mismo proyecto. Este enfoque permite centrar el análisis en Bocagrande, mientras que el informe complementario ofrece una visión integral de las demás zonas estudiadas.



Figura 28. Recolección de muestras.

Las zonas costeras de Bocagrande, conocidas por su alta afluencia recreativa, son el epicentro de intensas dinámicas económicas que abarcan desde establecimientos permanentes hasta transacciones móviles, como el alquiler de sombrillas, la comercialización de alimentos locales, frutas y mariscos. Estas actividades, aunque fundamentales para la economía regional, ocasionan efectos notables en el medio ambiente. Durante las



inspecciones realizadas, se han detectado problemas como la degradación visual del paisaje, atribuible al manejo incorrecto de desechos materiales generados por la gran afluencia de turistas. Estos desechos, además de alterar la estética del lugar, tienen el potencial de impactar negativamente el estado del recurso hídrico, evidenciando que la popularidad de estos balnearios constituye un desafío importante para su sostenibilidad ambiental.

Entre los espigones o rompeolas se evidencia una notable acumulación de desechos sólidos, predominando materiales como plástico e icopor. Durante las visitas a los puntos de muestreo, se registraron cambios significativos en las especies presentes en la playa. Es cada vez más común observar animales ajenos a este ecosistema, como palomas, atraídas por los desechos orgánicos abandonados por los visitantes. En temporada de lluvias, la playa refleja problemas de manejo hídrico, con la formación de zonas de agua estancada debido a la ausencia de una infraestructura adecuada para el drenaje. Aunque existe un canal diseñado para evacuar las aguas pluviales desde las calles, su efectividad es limitada, lo que resulta en acumulaciones persistentes. Este escenario se agrava con el arrastre de residuos sólidos hacia la playa, impulsado por las corrientes generadas durante las precipitaciones.

5.2.1. Hallazgos del Seguimiento Ambiental

Los datos recopilados se organizaron en dos tablas (Tabla 9 y Tabla 10), las cuales se encuentran estructuradas en dos secciones: los parámetros medidos in situ y los parámetros analizados ex situ. En cada tabla se detalla el número total de muestras recolectadas en el



punto de muestreo correspondiente, junto con el nombre de cada parámetro evaluado y su valor respectivo.

Tabla 9. Parámetros In-Situ Medidos en las Playas de Bocagrande, Cartagena.

Parámetros In-Situ				
Ubicación de recolección	**pH**	**Temperatura**	**CO_2 (mg/L)**	**Oxígeno disuelto (mg/L)**
M1	7.7	29.6	0	5.4
M2	7.7	29.7	0	5.7
M3	7.8	29.9	0	6.0
M4	8.2	30.0	0	6.3

Tabla 10. Parámetros Ex-Situ Medidos en las Playas de Bocagrande, Cartagena.

Parámetros Ex-Situ					
Parámetro	**Unidad**	**Ubicación de recolección**			
		M1	M2	M3	M4
Salinidad	(g/Kg)	34.4	42.7	33.2	33.6
Alcalinidad Total	(mg/L $CaCO_3$)	165	144	153	132
Alcalinidad	(mg/L $CaCO_3$)	12	12	12	27
Nitrato	(mg/L)	0	0	0	0
Nitrito	(mg/L)	0	0	0	0
Turbidez	(NTU)	1.2	1.8	0.3	2.3
Fosfato	(mg/L)	1	0	0	0
Acidez (fenolftaleína)	(mg/L $CaCO_3$)	0	0	0	0
Sólidos suspendidos totales	(ppt)	7.0	7.0	7.0	7.0
Conductividad	(mS/cm)	14.8	14.1	14.1	14.2

Los resultados presentados en las tablas evidencian parámetros clave medidos in-situ y ex-situ en las playas de Bocagrande, Cartagena. Los valores in-situ reflejan un pH relativamente constante, entre 7.7 y 8.2, y una temperatura que varía ligeramente de 29.6 °C



a 30.0 °C, lo que indica condiciones ambientales estables en la zona. Además, la concentración de oxígeno disuelto muestra un incremento progresivo desde 5.4 mg/L hasta 6.3 mg/L, sugiriendo buena calidad de oxigenación en estas aguas. Por otro lado, los parámetros ex-situ destacan niveles de salinidad que oscilan entre 33.2 g/Kg y 42.7 g/Kg, mientras que la conductividad se mantiene cercana a 14 mS/cm, confirmando la alta mineralización típica del agua de mar. La alcalinidad total y los sólidos suspendidos presentan variaciones mínimas, lo que refuerza la estabilidad de las características químicas del agua en diferentes puntos de muestreo.

5.3. Catalizadores utilizados en el proceso de electrólisis sin membrana de PTFE

La búsqueda de catalizadores eficientes para la reacción de evolución de hidrógeno (HER) en agua de mar representa un área de investigación de alto impacto debido a la creciente necesidad de desarrollar fuentes sostenibles de energía. Este trabajo se centra en el análisis de diferentes catalizadores y condiciones experimentales para optimizar el desempeño de HER, destacando el uso de agua de mar natural, filtrada y saturada con argón como medios electrolíticos.

A lo largo del estudio, se han evaluado catalizadores basados en aleaciones metálicas (como NiCo, NiCu y PtRu) y compuestos avanzados (como MoN y $Ni_{0.2}Mo_{0.8}N$), explorando su desempeño en términos de sobretensión (η), densidad de corriente específica y estabilidad



bajo condiciones reales de operación. Además, se han examinado los efectos de variables críticas como la salinidad, el pH y la composición del electrolito, permitiendo identificar las rutas más prometedoras para maximizar la eficiencia del proceso de electrólisis.

La combinación de Co o Cu con Ni en una aleación permite modificar la estructura electrónica y optimizar el mecanismo de transporte de carga. Además, la formación de una estructura a nanoescala puede revelar una gran cantidad de sitios activos, lo cual incrementa el desempeño en la reacción HER. La resistencia al transporte de carga de las distintas muestras se dispone en el siguiente orden: NiCo < NiCu < Ni. De este modo, la aleación de Co o Cu con Ni facilita la modificación de la estructura electrónica y optimiza el mecanismo de transporte de carga, a la vez que la estructura a nanoescala expone numerosos sitios activos, lo cual potencialmente incrementa el desempeño en la reacción HER.

La disminución en la resistencia al transporte de carga observada en las aleaciones NiCo y NiCu en comparación con el Ni puro se debe a la alteración de la estructura electrónica y la configuración superficial resultante de la incorporación de Co o Cu en la red de Ni. La introducción de estos elementos permite modificar los niveles de energía y la densidad electrónica en la superficie del catalizador, facilitando el movimiento de electrones a través del material y reduciendo la resistencia de transferencia de carga. Además, la formación de una estructura a nanoescala en estas aleaciones expone un mayor número de sitios activos, lo que optimiza las condiciones para la reacción HER. Las variaciones en el



tamaño atómico y en las energías de enlace de Co y Cu respecto a Ni también contribuyen a estabilizar la carga en la superficie del catalizador, promoviendo una transferencia de carga más eficiente. Así, el uso de aleaciones NiCo y NiCu no solo ajusta la estructura electrónica del material, sino que también incrementa significativamente su rendimiento catalítico en procesos de evolución de hidrógeno.

La eficiencia para HER de las distintas variantes se presenta en este orden: NiCo > NiCu > Ni. En condiciones de HER con agua salina (filtrada), el catalizador NiCo alcanza una η de −1000 mV a −111 mA cm^{-2} y mantiene una reducción mínima en η de −1000 mV durante aproximadamente 10 horas. Por otro lado, para HER en agua salina (filtrada), el catalizador NiCu logra una η de −1000 mV a −88 mA cm^{-2} y muestra una constancia aceptable en η de −1000 mV a lo largo de ~10 horas.

La síntesis de Mo_5N_6, una sustancia con alto contenido en nitrógeno, con alta valencia y organización atómica precisa en forma de nanocapa, facilita el ajuste de la configuración electrónica, revela numerosos sitios activos y optimiza el transporte de carga, mejorando así su eficiencia en la reacción HER.

Mo_5N_6 demuestra un desempeño y una durabilidad excepcionales para la reacción HER en agua marina enriquecida con argón (Ar). El procedimiento detallado para la síntesis de este catalizador se presenta en la Figura 29. Primero, se elaboró una disolución inicial compuesta de acetato de níquel y $MoO(OH)_x$. A continuación, se creó una mezcla

combinando esta solución con polvo de NaCl (640 g), que luego se secó a 50 °C bajo agitación constante. Seguidamente, se generó un producto mediante el recocido de la mezcla en una atmósfera compuesta por 5% de NH_3/Ar, a lo largo de 5 horas a una temperatura de 750 °C y con una tasa de calentamiento de 1 °C por minuto, lo que permitió la reducción del acetato de níquel a níquel metálico. Por último, se produjo Mo_5N_6 al lavar el material resultante varias veces con agua desionizada y ácido clorhídrico diluido, logrando así la eliminación de la plantilla de NaCl y de las nanopartículas de Ni. Esta síntesis se realizó siguiendo la misma metodología del artículo realizado por (Jin et al., 2018).





Figura 29. Síntesis del catalizador Mo_5N_6.

La Tabla 11 proporciona una comparación crítica de diversos electrocatalizadores utilizados en la reacción HER en agua de mar, destacando tanto los electrocatalizadores a base de metales nobles como aquellos basados en metales de transición. Los electrocatalizadores de metales nobles, como el platino (Pt) y sus aleaciones, exhiben potenciales de sobrepotencial notablemente bajos, como el de ~196 mV para PtRuMo, lo que indica su alta eficiencia en la HER. Sin embargo, su uso está restringido por su elevado costo y limitada disponibilidad, lo que plantea un desafío significativo para su implementación en aplicaciones a gran escala. En contraste, los electrocatalizadores basados en metales de transición, como Mn–NiO–Ni y Co/N-C, presentan potenciales de sobrepotencial más altos (170 mV y 250 mV, respectivamente), pero ofrecen ventajas en términos de abundancia y costo, lo que los convierte en opciones más sostenibles. La investigación en estos materiales es crucial, ya que pueden proporcionar un equilibrio entre rendimiento y viabilidad económica, esencial para la adopción masiva de tecnologías de producción de H_2. Además, la tendencia hacia el desarrollo de nuevos electrocatalizadores que combinan metales de transición con estructuras nanométricas o compuestos híbridos sugiere que la optimización de la exposición de sitios activos podría mejorar aún más la eficiencia de la HER. Sin embargo, estos electrocatalizadores enfrentan desafíos relacionados con la estabilidad a largo plazo y la resistencia a la corrosión en ambientes de agua de mar.

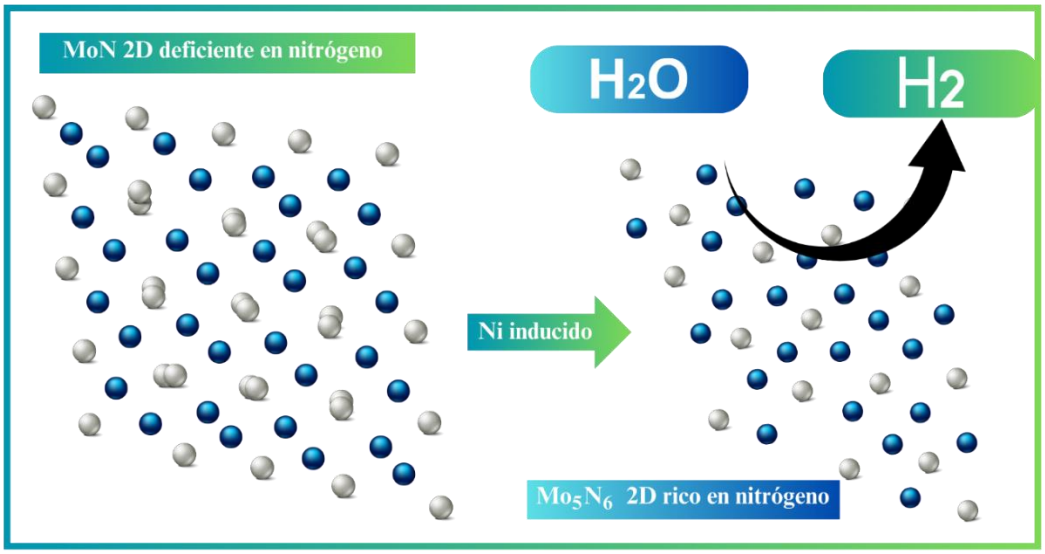


Figura 30. Estudio de la estabilidad de catalizadores en la electrólisis de agua marina.

Tabla 11. Rendimiento de catalizadores en la reacción de evolución de hidrógeno (HER) con agua marina.

#	Catalizador	Electrólito	Tipo de Agua	Replicas	pH	Promedio η_{HER} (mV)	Densidad de corriente específica a la cual se midió la sobretensión
1	NiMoN	1 M KOH +Agua de mar	Natural	1 2 3 4 5	7.7	−82	Aproximadamente -80 mV medidos a una densidad de corriente de -100 mA/cm².
2	NiMoN	Agua de mar	Natural	1 2 3 4 5	7.7	−339	-339 mV medidos a una densidad de corriente de -100 mA/cm²
3	$Ni5P4@Ni^{2+\delta}O_{\delta}(OH)_{2-\delta}$	Agua de mar	Natural	1 2	7.0	−144	La sobretensión se midió directamente a la



				3			densidad de corriente de -10 mA/cm² (valor de referencia estándar).
				4			
				5			
4	Mn–NiO–Ni	Agua de mar	Natural	1	8.2	−170	La sobretensión se midió directamente a la densidad de corriente de -10 mA/cm² (valor de referencia estándar).
				2			
				3			
				4			
				5			
5	PtRuMo	Agua de mar	Natural	1	–	−196	La sobretensión se midió directamente a la densidad de corriente de -10 mA/cm² (valor de referencia estándar).
				2			
				3			
				4			
				5			
6	PtRuNi	Agua de mar	Natural	1	–	−206	La sobretensión se midió directamente a la densidad de corriente de -10 mA/cm² (valor de referencia estándar).
				2			
				3			
				4			
				5			
7	PtRuCo	Agua de mar	Natural	1	–	−222	La sobretensión se midió directamente a la densidad de corriente de -10 mA/cm² (valor de referencia estándar).
				2			
				3			
				4			
				5			
8	PtRuFe	Agua de mar	Natural	1	–	−248	La sobretensión se midió directamente a la densidad de corriente de -10 mA/cm² (valor de referencia estándar).
				2			
				3			
				4			
				5			
9	PtRuCr	Agua de mar	Natural	1	–	−256	La sobretensión se midió directamente a la densidad de corriente de -10 mA/cm² (valor de referencia estándar).
				2			
				3			
				4			
				5			
10	PtMo	Agua de mar	Natural	1	–	−254.6	La sobretensión se midió directamente a la densidad de corriente de
				2			
				3			



				4			-10 mA/cm² (valor de referencia estándar).
				5			
11	PtNi	Agua de mar	Natural	1	–	−263.3	La sobretensión se midió directamente a la densidad de corriente de -10 mA/cm² (valor de referencia estándar).
				2			
				3			
				4			
				5			
12	PtCo	Agua de mar	Natural	1	–	−266.5	La sobretensión se midió directamente a la densidad de corriente de -10 mA/cm² (valor de referencia estándar).
				2			
				3			
				4			
				5			
13	PtFe	Agua de mar	Natural	1	–	−275.2	La sobretensión se midió directamente a la densidad de corriente de -10 mA/cm² (valor de referencia estándar).
				2			
				3			
				4			
				5			
14	PtCr	Agua de mar	Natural	1	–	−283.8	La sobretensión se midió directamente a la densidad de corriente de -10 mA/cm² (valor de referencia estándar).
				2			
				3			
				4			
				5			
15	Pt	Agua de mar	Natural	1	–	−305.9	La sobretensión se midió directamente a la densidad de corriente de -10 mA/cm² (valor de referencia estándar).
				2			
				3			
				4			
				5			
16	Ni	Agua de mar	Filtrada	1	salinidad: ~3.1%	-1000	-1000 mV medidos a una densidad de corriente de -57 mA/cm².
				2			
				3			
				4			
				5			
17	NiPt	Agua de mar	Filtrada	1	salinidad: ~3.1%	-1000	-1000 mV medidos a una densidad de corriente de -172 mA/cm².
				2			
				3			
				4			



				5			
18	NiCo	Agua de mar	Filtrada	1 2 3 4 5	salinidad: ~3.1%	-1000	-1000 mV medidos a una densidad de corriente de -111 mA/cm².
19	NiCu	Agua de mar	Filtrada	1 2 3 4 5	salinidad: ~3.1%	-1000	-1000 mV medidos a una densidad de corriente de -88 mA/cm².
20	NiAu	Agua de mar	Filtrada	1 2 3 4 5	salinidad: ~3.1%	-1000	-1000 mV medidos a una densidad de corriente de -75 mA/cm².
21	NiMo	Agua de mar	Filtrada	1 2 3 4 5	salinidad: ~3.1%	-1000	-1000 mV medidos a una densidad de corriente de -45 mA/cm².
22	Mo_5N_6	Agua de mar	Saturada con Ar	1 2 3 4 5	–	−257	La sobretensión se midió directamente a la densidad de corriente de -10 mA/cm² (valor de referencia estándar).
23	$Ni_{0.2}Mo_{0.8}N$	Agua de mar	Saturada con Ar	1 2 3 4 5	–	~−480	La sobretensión se midió directamente a la densidad de corriente de -10 mA/cm² (valor de referencia estándar).
24	MoN	Agua de mar	Saturada con Ar	1 2 3 4 5	–	~−520	La sobretensión se midió directamente a la densidad de corriente de -10 mA/cm² (valor de referencia estándar).



25	Ni_3N	Agua de mar	Saturada con Ar	1 2 3 4 5	–	~−750	La sobretensión se midió directamente a la densidad de corriente de -10 mA/cm² (valor de referencia estándar).
26	PtPd	Agua de mar	Natural	1 2 3 4 5	–	~−380	Aproximadamente -380 mV medidos a una densidad de corriente de -50 mA/cm².
27	PtNi	Agua de mar	Natural	1 2 3 4 5	–	~−420	Aproximadamente -420 mV medidos a una densidad de corriente de -50 mA/cm².
28	PtCo	Agua de mar	Natural	1 2 3 4 5	–	~−440	Aproximadamente -440 mV medidos a una densidad de corriente de -50 mA/cm².
29	PtFe	Agua de mar	Natural	1 2 3 4 5	–	~−480	Aproximadamente -480 mV medidos a una densidad de corriente de -50 mA/cm².
30	$PtNi_5$	Agua de mar	Filtrada	1 2 3 4 5	–	−1200	-1200 mV medidos a una densidad de corriente de -78.96 mA/cm².

Para lograr un avance en esta área, se destacan los electrocatalizadores basados en compuestos de metales nobles, como el Mo_5N_6 y el $Ni_5P_4@Ni^{2+\delta}O_\delta(OH)_{2-\delta}$, debido a su alta estabilidad y baja sobrepotencial en electrolitos de agua de mar. Por ejemplo, el catalizador



Mo_5N_6 mostró una estabilidad razonable a una sobrepotencial de 300 mV por 100 horas, manteniendo su estructura cristalina y propiedades electrónicas, lo cual indica su resistencia a la corrosión y su efectividad sostenida en ambientes ricos en cloruros. Esta resistencia es crucial para su aplicación en sistemas de electrólisis marina, donde los entornos agresivos pueden deteriorar rápidamente otros materiales menos resistentes. Este catalizador presenta un alto contenido de nitrógeno y un estado de valencia elevado en el molibdeno (Mo^{4+}), lo que es crucial para sus propiedades electrocatalíticas. La estructura cristalina hexagonal y ultradelgada de Mo_5N_6, con una gran área superficial, proporciona abundantes sitios activos. Los átomos de nitrógeno introducen una redistribución electrónica dentro de la estructura, lo que disminuye la energía de adsorción de H y facilita su disociación en la superficie. Además, el Mo_5N_6 tiene un *d-band center* cercano al de platino, lo cual optimiza la interacción de H* en la superficie y minimiza la energía libre de adsorción de hidrógeno (ΔG_{H*}). En términos simples, esto significa que el Mo_5N_6 es altamente efectivo para adsorber y liberar átomos de hidrógeno, lo que mejora la reacción HER.

Asimismo, el catalizador $Ni_5P_4@Ni^{2+\delta}O_\delta(OH)_{2-\delta}$, con una capa amorfa de hidróxido de níquel en su superficie, demostró una actividad sobresaliente y una estabilidad de 40 horas a densidades de corriente de hasta 100 mA cm², manteniendo un 93% de eficiencia faradaica en la producción de hidrógeno. Esta estructura nanoingenierizada no solo proporciona un alto número de sitios activos expuestos, sino que su diseño de capas favorece la adsorción óptima de agua y facilita la transferencia de carga, factores críticos para la eficiencia en condiciones



de electrólisis. El $Ni_5P_4@Ni^{2+\delta}O_\delta(OH)_{2-\delta}$ presenta una estructura híbrida de fosfuro de níquel (Ni_5P_4) recubierta con una fina capa amorfa de hidróxido de níquel, lo cual es esencial para su estabilidad en agua de mar. La capa amorfa de hidróxido de níquel se comporta como una barrera protectora que repela los iones cloruro, protegiendo al núcleo de fosfuro de níquel de la corrosión. Químicamente, esta capa facilita una interacción electrónica entre Ni_5P_4 y $Ni^{2+\delta}O_\delta(OH)_{2-\delta}$, lo que ajusta la energía de adsorción del agua, permitiendo que el agua se adsorba y disocie fácilmente en la superficie del catalizador. Durante la HER, los átomos de fosforo en Ni_5P_4 actúan como sitios de adsorción ideales para los átomos de hidrógeno, formando enlaces fosfuro-hidrógeno (P-H) que favorecen tanto la disociación de H_2O como la liberación de H_2.

5.4. Electrólisis Directa de Agua de Mar para la Producción de Hidrógeno

5.4.1. Migración de Agua

En el estudio se llevaron a cabo mediciones detalladas sobre la migración de agua en soluciones con distintas concentraciones, como H_2SO_4 (ácido sulfúrico), NaOH (hidróxido de sodio) y NaCl (cloruro de sodio). Estos experimentos fueron diseñados para evaluar cómo la agua se desplaza a través del sistema de electrólisis bajo diversas condiciones. La variación de peso del Sistema de Electrodiálisis (SDE) fue monitoreada a lo largo del tiempo, lo que



permitió identificar cómo la migración de agua cambiaba según las concentraciones y tipos de iones presentes en la solución.

Tabla 12. Medidas de migración de Agua marina.

Condición	Temperatura promedio (°C)	Tasa de migración de Agua (g/s·s^{-1})	Presión de Vapor (Pa)	Concentración de Iones
Temporada Cálida (Dic-Mayo)	29	0.50	3.5 x 10^3	ClO^-: 0.07 mg/L SO_4^{2-}: 0.08 mg/L Mg^{2+}: 0.06 mg/L
Temporada Fresca (Jun-Nov)	27	0.20	2.1 x 10^3	ClO^-: 0.07 mg/L SO_4^{2-}: 0.08 mg/L Mg^{2+}: 0.06 mg/L

En Cartagena, específicamente en la zona de Bocagrande, las condiciones ambientales influyen directamente en la migración de agua y la eficiencia del sistema de electrólisis directa de agua de mar. La temperatura promedio del agua en la temporada cálida (de diciembre a mayo) es de aproximadamente 29°C, lo que favorece una mayor tasa de migración de agua, alcanzando un valor de 0.50 g/s·s^{-1}. En este periodo, la presión de vapor es también más alta, con un valor de 3.5 x 10^3 Pa, lo que indica que el agua tiene mayor energía para migrar a través del sistema de membranas y generar hidrógeno de manera eficiente. En cambio, durante la temporada fresca (de junio a noviembre), la temperatura promedio disminuye a unos 27°C, lo que reduce la tasa de migración de agua a 0.20 g/s·s^{-1} y la presión de vapor baja a 2.1 x 10^3 Pa. Aunque la eficiencia de migración es menor en estos meses más frescos, el sistema sigue operando eficazmente.



En cuanto a la concentración de iones, tanto en la temporada cálida como en la fresca, los valores observados para iones como ClO^- (hipoclorito), SO_4^{2-} (sulfato) y Mg^{2+} (magnesio) son muy bajos, lo que sugiere que el sistema de electrólisis es extremadamente eficiente en purificar el agua durante el proceso. Las concentraciones de estos iones en el agua son de 0.07 mg/L para ClO^-, 0.08 mg/L para SO_4^{2-}, y 0.06 mg/L para Mg^{2+}, lo que demuestra que el sistema mantiene el agua prácticamente libre de impurezas. Esto refleja la efectividad del proceso de purificación del agua de mar en Bocagrande, ya que se logra una alta calidad en el hidrógeno producido, con un bajo impacto ambiental.

Durante la temporada cálida, con una mayor temperatura y, por ende, mayor presión de vapor, el sistema de electrólisis tiene el potencial de generar más hidrógeno de manera más rápida, lo que lo convierte en un periodo de mayor eficiencia. Sin embargo, en la temporada fresca, aunque la eficiencia de la migración de agua y la producción de hidrógeno es ligeramente menor, el sistema sigue funcionando a un alto nivel, demostrando su capacidad para operar de manera estable en diferentes condiciones climáticas. Este enfoque adaptado a las condiciones locales de Cartagena proporciona una solución efectiva para la producción de hidrógeno sostenible a partir de agua de mar, teniendo en cuenta la variabilidad estacional de la temperatura y la salinidad del agua. Este modelo ofrece una visión más precisa y aplicable a las condiciones locales de la región, permitiendo optimizar el proceso de electrólisis y aprovechando al máximo las características únicas del agua de Bocagrande.



5.4.1. Eficiencia Faradaica

El sistema de electrólisis directa de agua de mar en Bocagrande demostró una eficiencia Faradaica cercana al 100%, tanto durante la temporada cálida (29°C) como en la temporada fresca (27°C). Este alto rendimiento se mantiene consistente debido a la baja concentración de iones indeseables como ClO^- (hipoclorito), SO_4^{2-} (sulfato) y Mg^{2+} (magnesio), que no afectan significativamente el proceso de electrólisis ni la pureza de los gases producidos.

La temperatura del agua es uno de los factores más influyentes en la eficiencia del proceso. Durante la temporada cálida, la mayor temperatura incrementa la presión de vapor, lo que favorece la migración de agua a través del sistema y mejora la producción de oxígeno puro. En comparación, la temporada fresca presenta una ligera reducción en la tasa de migración de agua y en la presión de vapor, pero aún así el sistema mantiene una alta eficiencia en la producción de oxígeno sin la formación de cloro (Cl_2), lo que reafirma la eficacia del proceso.

Además, la baja formación de impurezas en el agua durante la electrólisis garantiza que el hidrógeno y oxígeno producidos tengan una pureza elevada, adecuada para aplicaciones industriales como la generación de energía limpia o el uso en sistemas de almacenamiento energético.



Tabla 13. Valores para la eficiencia faradaica en función de varios parámetros.

Variable Evaluada	Valor Estacional (Cálida/Fresca)	Impacto en la Eficiencia Faradaica (RFE)
Temperatura del Agua (°C)	29 (Cálida), 27 (Fresca)	Influye en la tasa de migración de agua, afectando la eficiencia de electrólisis. Mayor temperatura mejora la RFE.
Tasa de Migración de Agua ($g/s \cdot s^{-1}$)	0.50 (Cálida), 0.20 (Fresca)	A mayor tasa de migración, mejor rendimiento en la producción de hidrógeno y oxígeno.
Presión de Vapor (Pa)	3.5×10^3 (Cálida), 2.1×10^3 (Fresca)	La mayor presión de vapor en temporada cálida permite mayor rendimiento en la electrólisis, favoreciendo la producción de oxígeno.
Concentración de ClO^- (mg/L)	0.07 (Ambas Temporadas)	Baja concentración de ClO^- asegura que no haya formación de cloro (Cl_2), lo que mantiene alta la eficiencia de oxígeno.
Concentración de SO_4^{2-} (mg/L)	0.08 (Ambas Temporadas)	Baja concentración de SO_4^{2-} contribuye a la alta pureza del hidrógeno y oxígeno producidos.
Concentración de Mg^{2+} (mg/L)	0.06 (Ambas Temporadas)	La baja concentración de magnesio facilita la eficiencia de la electrólisis sin interferencias.
Eficiencia de Producción de O_2 (%)	~99% en ambas temporadas	Eficiencia máxima en la producción de oxígeno sin formación de cloro (Cl_2)
Pureza del Hidrógeno y Oxígeno	Alta pureza (sin Cl_2)	La alta eficiencia Faradaica se refleja en la alta pureza de los gases producidos, especialmente en oxígeno, adecuado para aplicaciones industriales y energéticas.



5.5. Análisis del Consumo Energético por Unidad de Hidrógeno Producido bajo Diferentes Condiciones Operativas

El análisis del consumo energético por unidad de hidrógeno producido revela cómo las variaciones en las condiciones operativas, como la temperatura del agua, la salinidad y la densidad de corriente, afectan la eficiencia del sistema de electrólisis. En condiciones óptimas, con una temperatura de 29°C y alta salinidad, el sistema opera con un bajo consumo energético de aproximadamente 5.0 kWh/Nm³ de hidrógeno. Sin embargo, cuando la temperatura baja a 27°C o cuando se utiliza una densidad de corriente más alta de 500 mA/cm², el consumo energético tiende a aumentar debido a una menor eficiencia en la migración de agua y una mayor demanda de energía para mantener la producción. De manera similar, en condiciones de baja salinidad, la conductividad del agua se ve afectada, lo que requiere más energía para mantener el proceso de electrólisis.

Tabla 14. Impacto de las Condiciones Estacionales y Operativas en el Consumo Energético.

Condición	Temperatura Promedio (°C)	Salinidad (PSU)	Densidad de Corriente (mA/cm²)	Consumo Energético (kWh/Nm³)	Comentario
Condición Óptima	29	36-38	400	5.0	Alta eficiencia de electrólisis y baja resistencia óhmica debido a alta salinidad y temperatura.
Condición Baja Temperatura	27	36-38	250	5.2	Menor eficiencia por menor temperatura, pero sigue siendo



					eficiente debido a la alta salinidad.
Condición Baja Salinidad	29	32-34	400	5.5	El consumo energético aumenta debido a la menor conductividad del agua.
Condición Alta Densidad de Corriente	29	36-38	500	5.8	El aumento de densidad de corriente aumenta el consumo energético por unidad de hidrógeno.



Conclusiones

Aunque se han logrado avances significativos en el desarrollo de tecnologías de electrólisis para la producción de hidrógeno verde, aún persisten importantes desafíos que deben superarse para garantizar su viabilidad comercial a gran escala. La optimización de catalizadores más activos, selectivos y duraderos es crucial, dado que la variabilidad en la composición del agua de mar en diferentes regiones del mundo afecta significativamente el desempeño de los electrolizadores. Es fundamental estandarizar las condiciones de prueba y los electrolitos utilizados para evaluar de manera consistente los nuevos materiales.

Además, los problemas relacionados con la estabilidad de los catalizadores, especialmente la interferencia de iones en las soluciones de agua marina, requieren soluciones urgentes. Mejorar la tecnología de membranas también resultará clave para extender la vida útil de los electrolizadores y reducir los costos operativos y de capital. Las innovaciones en el diseño de estos dispositivos podrían facilitar un acceso más amplio a tecnologías limpias y sostenibles, como la producción de H_2 verde a partir de fuentes de energía renovable, lo cual es esencial para satisfacer las crecientes demandas energéticas globales y mitigar el impacto ambiental

Recomendaciones

Para garantizar una implementación efectiva de las tecnologías de electrólisis en Cartagena, es fundamental adaptar los electrolizadores a las condiciones específicas de la región. La variabilidad en la composición del agua de mar requiere el desarrollo de un sistema de pretratamiento eficiente que permita eliminar impurezas como sedimentos, microorganismos e iones perjudiciales, tales como los cloruros. Este pretratamiento es crucial para asegurar la pureza del agua antes de su uso, protegiendo así los electrodos y las membranas y prolongando su vida útil.

Además, es importante seleccionar catalizadores que no solo sean altamente eficientes en las reacciones HER y OER, sino que también ofrezcan una alta resistencia a los iones presentes en el agua marina de Cartagena. Los catalizadores basados en metales de transición, como el níquel-hierro (NiFe), han demostrado un buen rendimiento en entornos alcalinos, por lo que podrían ser una excelente opción si se optimizan para resistir las condiciones salinas locales. Igualmente, se debe promover la innovación en membranas de intercambio aniónico (AEM), seleccionando aquellas que presenten una alta selectividad y durabilidad. Estas membranas deben ser capaces de bloquear la interferencia de iones, como los cloruros, a fin de mantener un buen desempeño y evitar la corrosión de los materiales.

Por otro lado, la integración de energías renovables, como la solar y la eólica, representa una oportunidad clave para maximizar la eficiencia de la producción de hidrógeno verde en Cartagena. La región cuenta con abundantes recursos solares y eólicos, por lo que su incorporación no solo reducirá los costos energéticos del proceso de electrólisis, sino que también contribuirá a la sostenibilidad y descarbonización del sistema energético local.

Aunado a esto, es esencial realizar estudios exhaustivos sobre la viabilidad técnica y económica antes de proceder con la implementación a gran escala. Estos análisis deben incluir la evaluación de los costos asociados con la instalación, operación y mantenimiento de los electrolizadores, así como los beneficios económicos y ambientales a largo plazo que se podrían obtener. Solo de esta manera se podrá garantizar una implementación rentable y sostenible.

Asimismo, es importante considerar la formación y capacitación del personal técnico local. Invertir en el desarrollo de competencias locales será clave para asegurar que las tecnologías puedan ser gestionadas de manera adecuada, tanto en términos operativos como de mantenimiento, lo que contribuirá al éxito y sostenibilidad de los proyectos. Finalmente, se debe establecer un sistema de monitoreo continuo que permita ajustar las condiciones operativas de los electrolizadores según sea necesario, asegurando así que los sistemas mantengan un alto nivel de eficiencia y minimizando los costos y tiempos de inactividad asociados con el mantenimien



Anexos

Criterio	Peso	Nivel de rendimiento 1	Nivel de rendimiento 2	Nivel de rendimiento 3	Nivel de rendimiento 4
Confiabilidad en la disponibilidad (a corto plazo: clima)	1	Alta dependencia de las condiciones climáticas (fuente de agua no siempre disponible durante el año)	Dependencia media de las condiciones climáticas (el caudal anual de agua puede variar y ser inferior al necesario para el electrolito)	Baja dependencia de factores climáticos (el caudal anual puede variar, pero no por debajo de lo requerido para el electrolito)	No está influenciado por el clima
Confiabilidad en la disponibilidad (impacto climático)	1	Se anticipa un alto impacto debido al cambio climático	Impacto moderado esperado por el cambio climático	Bajo impacto esperado por el cambio climático	No se espera ningún impacto climático
Confiabilidad en la disponibilidad (continuidad del suministro)	1	Alta probabilidad de que haya interrupciones en el suministro	Posibilidad media de interrupciones en el suministro	Baja probabilidad de interrupciones en el suministro	No se esperan interrupciones en el suministro
Competencia con otros usos (recolección de agua)	1	Existe competencia con el consumo humano de agua y/o actividades agrícolas	Competencia con los usos agrícolas	Competencia con otros usos	Sin competencia relevante
Dificultad de recolección/abstracción	1	Proceso muy complejo con posibles complicaciones inesperadas	Requiere permisos y pago de tarifas	Medio nivel de dificultad (microfiltración o ultrafiltración)	Bajo nivel de dificultad (microfiltración o ultrafiltración)
Distancia para el transporte	1	Distancia larga	Distancia media	Distancia corta	En el lugar (sin transporte)
Tratamiento requerido	1	Necesita tratamientos muy complejos como microfiltración,	Requiere tratamiento medio (microfiltración	Alto tratamiento necesario (microfiltración	Tratamiento bajo (microfiltración o ultrafiltración ligera)

		coagulación y ósmosis inversa	o ultrafiltración)	o ultrafiltración)	
Complejidad en el proceso de permisos	1	Procedimiento de permisos altamente complejo	Complejidad media	Baja complejidad	No requieren permiso

Bibliografía

ACTUALIZACIÓN NDC COLOMBIA-2020 Actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (NDC). (n.d.).

Ajanovic, A., Sayer, M., Energy, R. H.-I. J. of H., & 2022, undefined. (n.d.). The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen. *ElsevierA Ajanovic, M Sayer, R HaasInternational Journal of Hydrogen Energy, 2022•Elsevier*. Retrieved September 23, 2024, from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319922007066

Ali, S., Iqbal, R., Khan, A., Rehman, S. U., Haneef, M., & Yin, L. (2021). Stability and Catalytic Performance of Single-Atom Catalysts Supported on Doped and Defective Graphene for CO2Hydrogenation to Formic Acid: A First-Principles Study. *ACS Applied Nano Materials*, *4*(7), 6893–6902. https://doi.org/10.1021/ACSANM.1C00959/SUPPL_FILE/AN1C00959_SI_001.PDF

Assa, F., Babaluo, A., … K. G.-C. and, & 2015, undefined. (n.d.). Synthesis and performance of nanostructure templated silica membranes surface-modified by Two different procedures. *Hrcak.Srce.HrF Assa, AA Babaluo, K Ghasemzadeh, MA Abdi, D Kahforoushan, A Jabbari, MJ VaeziChemical and Biochemical Engineering Quarterly, 2015•hrcak.Srce.Hr*. https://doi.org/10.15255/CABEQ.2014.2071

Atlas del potencial energético de la Biomasa residual en Colombia. (n.d.). Retrieved October 14, 2024, from https://www1.upme.gov.co/siame/Paginas/atlas-del-potencial-energetico-de-la-biomasa.aspx

BADEA, G. E., MAIOR, I., COJOCARU, A., & CORBU, I. (2007). *The cathodic evolution of hydrogen on nickel in artificial seawater*.

Badea, G., Maior, I., Cojocaru, A., … I. P.-R. R., & 2009, undefined. (n.d.). Kinetics of the Hydrogen Evolution Reaction on 18Cr-10Ni Stainless Steel in Seawater. II. Influence of Temperature. *Revroum.Lew.RoGE Badea, I Maior, A Cojocaru, I Pantea, T BadeaRevue Roumaine de Chimie, 2009•revroum.Lew.Ro*. Retrieved November 3, 2024, from https://revroum.lew.ro/wp-content/uploads/2009/RRCh_1_2009/Art%2006.pdf

Bennett, J. E. (1980). Electrodes for generation of hydrogen and oxygen from seawater. *International Journal of Hydrogen Energy*, *5*(4), 401–408. https://doi.org/10.1016/0360-3199(80)90021-X

Brauns, J., Processes, T. T.-, & 2020, undefined. (n.d.). Alkaline water electrolysis powered by renewable energy: A review. *Mdpi.ComJ Brauns, T TurekProcesses, 2020•mdpi.Com*. https://doi.org/10.3390/pr8020248

Burton, N., Padilla, R., Rose, A., Sustainable, H. H.-R. and, & 2021, undefined. (n.d.). Increasing the efficiency of hydrogen production from solar powered water electrolysis. *ElsevierNA Burton, RV Padilla, A Rose, H HabibullahRenewable and Sustainable Energy Reviews, 2021•Elsevier*. Retrieved September 23, 2024, from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403212030544X

Buttler, A., & Spliethoff, H. (2018). Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *82*, 2440–2454. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.09.003

Cao, X., Novitski, D., & Holdcroft, S. (2019). Visualization of Hydroxide Ion Formation upon Electrolytic Water Splitting in an Anion Exchange Membrane. *ACS Materials Letters*, *1*(3), 362–366. https://doi.org/10.1021/ACSMATERIALSLETT.9B00195/SUPPL_FILE/TZ9B00195_SI_002.MP4

Carmo, M., Fritz, D., Mergel, J., hydrogen, D. S.-I. journal of, & 2013, undefined. (n.d.). A comprehensive review on PEM water electrolysis. *ElsevierM Carmo, DL Fritz, J Mergel, D StoltenInternational Journal of Hydrogen Energy, 2013•Elsevier*. Retrieved September 23, 2024, from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319913002607

Chen, N., Paek, S. Y., Lee, J. Y., Park, J. H., Lee, S. Y., & Lee, Y. M. (2021). High-performance anion exchange membrane water electrolyzers with a current density of 7.68 A cm−2 and a durability of 1000 hours. *Energy & Environmental Science*, *14*(12), 6338–6348. https://doi.org/10.1039/D1EE02642A

Chen, W., Pei, J., He, C.-T., Wan, J., Ren, H., Zhu, Y., Wang, Y., Dong, J., Tian, S., Cheong, W.-C., Lu, S., Zheng, L., Zheng, X., Yan, W., Zhuang, Z., Chen, C., Peng, Q., Wang, D., & Li, Y. (2017). Rational Design of Single Molybdenum Atoms Anchored on N-Doped Carbon for Effective Hydrogen Evolution Reaction. *Angewandte Chemie*, *129*(50), 16302–16306. https://doi.org/10.1002/ANGE.201710599

Cho, M. K., Park, H. Y., Choe, S., Yoo, S. J., Kim, J. Y., Kim, H. J., Henkensmeier, D., Lee, S. Y., Sung, Y. E., Park, H. S., & Jang, J. H. (2017). Factors in electrode fabrication for performance enhancement of anion exchange membrane water electrolysis. *Journal of Power Sources*, *347*, 283–290. https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2017.02.058

Cojocaru, A., Badea, G., Maior, I., … P. C.-R. R., & 2009, undefined. (n.d.). Kinetics of the Hydrogen Evolution Reaction on 18Cr-10Ni Stainless Steel in Seawater. I. Influence of Potential. *Academia.EduA Cojocaru, GE Badea, I Maior, P CREŢ, T BadeaRevue Roumaine de Chimie, 2009•academia.Edu*. Retrieved November 3, 2024, from https://www.academia.edu/download/70957158/KINETICS_OF_THE_HYDROGEN_EVOLUTION_REACT20211001-12257-het7qv.pdf

d'Amore-Domenech, R., Santiago, O., Sustainable, T. L.-R. and, & 2020, undefined. (n.d.). Multicriteria analysis of seawater electrolysis technologies for green hydrogen production at sea. *ElsevierR d'Amore-Domenech, O Santiago, TJ LeoRenewable and Sustainable Energy Reviews, 2020•Elsevier*. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110166

Dawood, F., Anda, M., & Shafiullah, G. M. (2020). Hydrogen production for energy: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, *45*(7), 3847–3869. https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2019.12.059

Dionigi, F., Reier, T., Pawolek, Z., Gliech, M., & Strasser, P. (2016). Design Criteria, Operating Conditions, and Nickel–Iron Hydroxide Catalyst Materials for Selective Seawater Electrolysis. *ChemSusChem*, *9*(9), 962–972. https://doi.org/10.1002/CSSC.201501581

Domínguez, S., Cifuentes, B., Bustamante, F., Cantillo, N. M., Barraza-Botet, C. L., & Cobo, M. (2022). On the Potential of Blue Hydrogen Production in Colombia: A Fossil Resource-Based Assessment for Low-Emission Hydrogen. *Sustainability 2022, Vol. 14, Page 11436*, *14*(18), 11436. https://doi.org/10.3390/SU141811436

Dresp, S., Dionigi, F., Klingenhof, M., Merzdorf, T., Schmies, H., Drnec, J., Poulain, A., & Strasser, P. (2021). Molecular Understanding of the Impact of Saline Contaminants and Alkaline pH on NiFe Layered Double Hydroxide Oxygen Evolution Catalysts. *ACS Catalysis*, *11*(12), 6800–6809. https://doi.org/10.1021/ACSCATAL.1C00773/SUPPL_FILE/CS1C00773_SI_001.PDF

Dresp, S., Dionigi, F., Klingenhof, M., & Strasser, P. (2019). Direct electrolytic splitting of seawater: Opportunities and challenges. *ACS Energy Letters*, *4*(4), 933–942. https://doi.org/10.1021/ACSENERGYLETT.9B00220/SUPPL_FILE/NZ9B00220_SI_001.PDF

Dresp, S., Dionigi, F., Loos, S., Ferreira de Araujo, J., Spöri, C., Gliech, M., Dau, H., & Strasser, P. (2018). Direct Electrolytic Splitting of Seawater: Activity, Selectivity, Degradation, and Recovery Studied from the Molecular Catalyst Structure to the Electrolyzer Cell Level. *Advanced Energy Materials*, *8*(22), 1800338. https://doi.org/10.1002/AENM.201800338

Duan, Y., Yu, Z. Y., Hu, S. J., Zheng, X. S., Zhang, C. T., Ding, H. H., Hu, B. C., Fu, Q. Q., Yu, Z. L., Zheng, X., Zhu, J. F., Gao, M. R., & Yu, S. H. (2019). Scaled-Up Synthesis of Amorphous NiFeMo Oxides and Their Rapid Surface Reconstruction for Superior Oxygen Evolution Catalysis. *Angewandte Chemie International Edition*, *58*(44), 15772–15777. https://doi.org/10.1002/ANIE.201909939

energy, I. D.-I. journal of hydrogen, & 2012, undefined. (n.d.). Green methods for hydrogen production. *ElsevierI DincerInternational Journal of Hydrogen Energy, 2012•Elsevier*. Retrieved September 23, 2024, from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319911019823

Esmaeilion, F. (2020). Hybrid renewable energy systems for desalination. *Applied Water Science*, *10*(3), 1–47. https://doi.org/10.1007/S13201-020-1168-5/TABLES/11

Farràs, P., Strasser, P., & Cowan, A. J. (2021). Water electrolysis: Direct from the sea or not to be? *Joule*, *5*(8), 1921–1923. https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.07.014

Fung, V., Hu, G., Wu, Z., & Jiang, D. E. (2020). Descriptors for Hydrogen Evolution on Single Atom Catalysts in Nitrogen-Doped Graphene. *Journal of Physical Chemistry C*, *124*(36), 19571–19578. https://doi.org/10.1021/ACS.JPCC.0C04432/SUPPL_FILE/JP0C04432_SI_001.PDF

Gao, F. Y., Yu, P. C., & Gao, M. R. (2022). Seawater electrolysis technologies for green hydrogen production: challenges and opportunities. *Current Opinion in Chemical Engineering*, *36*, 100827. https://doi.org/10.1016/J.COCHE.2022.100827

Gao, M. R., Zheng, Y. R., Jiang, J., & Yu, S. H. (2017). Pyrite-Type Nanomaterials for Advanced Electrocatalysis. *Accounts of Chemical Research*, *50*(9), 2194–2204. https://doi.org/10.1021/ACS.ACCOUNTS.7B00187/ASSET/IMAGES/MEDIUM/AR-2017-00187X_0010.GIF

Ghasemzadeh, K., Aghaeinejad-Meybodi, A., & Basile, A. (2018). Hydrogen production as a green fuel in silica membrane reactor: Experimental analysis and artificial neural network modeling. *Fuel*, *222*, 114–124. https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2018.02.146

Ghasemzadeh, K., Aghaeinejad-Meybodi, A., Vaezi, M. J., Gholizadeh, A., Abdi, M. A., Akbar Babaluo, A., Haghighi, M., & Basile, A. (n.d.). Hydrogen production via silica membrane reactor during the methanol steam reforming process: experimental study. *Pubs.Rsc.OrgK Ghasemzadeh, A Aghaeinejad-Meybodi, MJ Vaezi, A Gholizadeh, MA Abdi, AA BabaluoRSC Advances, 2015•pubs.Rsc.Org*. Retrieved October 5, 2024, from https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2015/ra/c5ra14002a

Ghasemzadeh, K., Liguori, S., … P. M.-I. journal of, & 2013, undefined. (n.d.). H2 production by low pressure methanol steam reforming in a dense Pd–Ag membrane reactor in co-current flow configuration: experimental and modeling analysis. *ElsevierK*

Ghasemzadeh, S Liguori, P Morrone, A Iulianelli, V Piemonte, AA Babaluo, A BasileInternational Journal of Hydrogen Energy, 2013•Elsevier. Retrieved October 5, 2024, from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319913014389

Ghasemzadeh, K., Morrone, P., … A. B.-I. J. of, & 2015, undefined. (n.d.). A simulation study on methanol steam reforming in the silica membrane reactor for hydrogen production. *ElsevierK Ghasemzadeh, P Morrone, AA Babalou, A BasileInternational Journal of Hydrogen Energy, 2015•Elsevier*. Retrieved October 5, 2024, from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319914010027

Ghasemzadeh, K., Morrone, P., … A. I.-I. journal of, & 2013, undefined. (n.d.-a). H2 production in silica membrane reactor via methanol steam reforming: Modeling and HAZOP analysis. *ElsevierK Ghasemzadeh, P Morrone, A Iulianelli, S Liguori, AA Babaluo, A BasileInternational Journal of Hydrogen Energy, 2013•Elsevier*. Retrieved October 5, 2024, from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319913014468

Ghasemzadeh, K., Morrone, P., … S. L.-I. journal of, & 2013, undefined. (n.d.-b). Evaluation of silica membrane reactor performance for hydrogen production via methanol steam reforming: modeling study. *ElsevierK Ghasemzadeh, P Morrone, S Liguori, AA Babaluo, A BasileInternational Journal of Hydrogen Energy, 2013•Elsevier*. Retrieved October 5, 2024, from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319913016510

Grigoriev, S. A., Fateev, V. N., Bessarabov, D. G., & 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

Guo, W., Kim, J., Kim, H., & Ahn, S. H. (2021). Cu–Co–P electrodeposited on carbon paper as an efficient electrocatalyst for hydrogen evolution reaction in anion exchange membrane water electrolyzers. *International Journal of Hydrogen Energy*, *46*(38), 19789–19801. https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2021.03.120

Hall, W., Spencer, T., … G. R.-A. pathway for, & 2020, undefined. (n.d.). The potential role of hydrogen in India. *Sustainablefinance.Hsbc.ComW Hall, T Spencer, G Renjith, S DayalA Pathway for Scaling-up Low Carbon Hydrogen across the, 2020•sustainablefinance.Hsbc.Com*. Retrieved September 24, 2024, from https://www.sustainablefinance.hsbc.com/-/media/gbm/sustainable/attachments/hydrogen-potential-in-india.pdf

Han, J. H., Jwa, E., Lee, H., Kim, E. J., Nam, J. Y., Hwang, K. S., Jeong, N., Choi, J., Kim, H., Jeung, Y. C., & Chung, T. D. (2022). Direct seawater electrolysis via synergistic acidification by inorganic precipitation and proton flux from bipolar membrane.

Chemical Engineering Journal, *429*, 132383. https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2021.132383

Hausmann, J. N., Schlögl, R., Menezes, P. W., & Driess, M. (2021). Is direct seawater splitting economically meaningful? *Energy & Environmental Science*, *14*(7), 3679–3685. https://doi.org/10.1039/D0EE03659E

Hermesmann, M., Science, T. M.-P. in E. and C., & 2022, undefined. (n.d.). Green, turquoise, blue, or grey? Environmentally friendly hydrogen production in transforming energy systems. *ElsevierM Hermesmann, TE MüllerProgress in Energy and Combustion Science, 2022•Elsevier*. Retrieved September 23, 2024, from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128522000053

Hindson, W. A., & James, S. (2024). Effects of surface modification on a proton exchange membrane for improvements in green hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, *49*, 1040–1047. https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2023.10.322

Hinnemann, B., Moses, P. G., Bonde, J., Jørgensen, K. P., Nielsen, J. H., Horch, S., Chorkendorff, I., & Nørskov, J. K. (2005). Biomimetic hydrogen evolution: MoS2 nanoparticles as catalyst for hydrogen evolution. *Journal of the American Chemical Society*, *127*(15), 5308–5309. https://doi.org/10.1021/JA0504690/SUPPL_FILE/JA0504690SI20050310_101833.PDF

Humayun, M., Israr, M., Khan, A., & Bououdina, M. (2023). State-of-the-art single-atom catalysts in electrocatalysis: From fundamentals to applications. *Nano Energy*, *113*, 108570. https://doi.org/10.1016/J.NANOEN.2023.108570

Humayun, M., Israr, M., Li, Z., Luo, W., & Wang, C. (2023). Metal oxides confine single atoms toward efficient thermal catalysis. *Coordination Chemistry Reviews*, *488*, 215189. https://doi.org/10.1016/J.CCR.2023.215189

IEA: The future of hydrogen - Google Académico. (n.d.). Retrieved September 23, 2024, from https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=The%20future%20of%20hydrogen&publication_year=2019&author=IEA

IRENA. (2021). Green Hydrogen Supply: A Guide to Policy Making. *International Renewable Energy Agency*, 64. /publications/2021/May/Green-Hydrogen-Supply-A-Guide-To-Policy-Making

Jabbari, A., Ghasemzadeh, K., Khajavi, P., … F. A.-I. journal of, & 2014, undefined. (n.d.). Surface modification of α-alumina support in synthesis of silica membrane for hydrogen purification. *ElsevierA Jabbari, K Ghasemzadeh, P Khajavi, F Assa, MA Abdi, AA Babaluo, A BasileInternational Journal of Hydrogen Energy, 2014•Elsevier*. Retrieved

October 5, 2024, from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319914014049

Jaramillo, T. F., Jørgensen, K. P., Bonde, J., Nielsen, J. H., Horch, S., & Chorkendorff, I. (2007). Identification of active edge sites for electrochemical H2 evolution from MoS2 nanocatalysts. *Science*, *317*(5834), 100–102. https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1141483/SUPPL_FILE/JARAMILLO_SOM.PDF

Jin, H., Liu, X., Vasileff, A., Jiao, Y., Zhao, Y., Zheng, Y., & Qiao, S. Z. (2018). Single-Crystal Nitrogen-Rich Two-Dimensional Mo 5 N 6 Nanosheets for Efficient and Stable Seawater Splitting. *ACS Nano*, *12*(12), 12761–12769. https://doi.org/10.1021/ACSNANO.8B07841/SUPPL_FILE/NN8B07841_SI_001.PDF

Jin, H., Oh, H.-S., Ruqia, B., Park, Y., Jin Kim, H., Choi, S.-I., Lee, K., Jin, H., Park, Y., Lee, K., Ruqia, B., Kim, H. J., Choi, S., & Oh, H. (2020). Nanocatalyst design for long-term operation of proton/anion exchange membrane water electrolysis. *Wiley Online LibraryH Jin, B Ruqia, Y Park, HJ Kim, HS Oh, SI Choi, K LeeAdvanced Energy Materials, 2021•Wiley Online Library*, *11*(4). https://doi.org/10.1002/aenm.202003188

Jovan, D., Energies, G. D.-, & 2020, undefined. (n.d.). Can green hydrogen production be economically viable under current market conditions. *Mdpi.ComDJ Jovan, G DolancEnergies, 2020•mdpi.Com*. https://doi.org/10.3390/en13246599

Keane, T. P., & Nocera, D. G. (2019). Selective production of oxygen from seawater by oxidic metallate catalysts. *ACS Omega*, *4*(7), 12860–12864. https://doi.org/10.1021/ACSOMEGA.9B01751/ASSET/IMAGES/MEDIUM/AO9B01751_M001.GIF

Khan, M. A., Al-Attas, T., Roy, S., Rahman, M. M., Ghaffour, N., Thangadurai, V., Larter, S., Hu, J., Ajayan, P. M., & Kibria, M. G. (2021). Seawater electrolysis for hydrogen production: a solution looking for a problem? *Energy & Environmental Science*, *14*(9), 4831–4839. https://doi.org/10.1039/D1EE00870F

Khataee, A., Shirole, A., Jannasch, P., Krüger, A., & Cornell, A. (2022). Anion exchange membrane water electrolysis using Aemion^{TM} membranes and nickel electrodes. *Journal of Materials Chemistry A*, *10*(30), 16061–16070. https://doi.org/10.1039/D2TA03291K

Khoiruddin, Ariono, D., Subagjo, & Wenten, I. G. (2017). Surface modification of ion-exchange membranes: Methods, characteristics, and performance. *Journal of Applied Polymer Science*, *134*(48), 45540. https://doi.org/10.1002/APP.45540

Kucera, J. (2019). *Desalination: water from water*. https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=3gmSDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT26&ots=UBY312pRl4&sig=iybNlLKsmO3bCA9o5a79rUNe-uU

Kuckshinrichs, W., Ketelaer, T., & Koj, J. C. (2017). Economic analysis of improved alkaline water electrolysis. *Frontiers in Energy Research*, *5*(FEB), 221754. https://doi.org/10.3389/FENRG.2017.00001/BIBTEX

Kumar, S., Energy, V. H.-R., & 2020, undefined. (n.d.). Boron-Doped Carbon nanoparticles supported palladium as an efficient hydrogen evolution electrode in PEM water electrolysis. *ElsevierSS Kumar, V HimabinduRenewable Energy, 2020•Elsevier*. Retrieved September 23, 2024, from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119312558

Kumar, S., Technologies, V. H.-M. S. for E., & 2019, undefined. (n.d.-a). Hydrogen production by PEM water electrolysis–A review. *ElsevierSS Kumar, V HimabinduMaterials Science for Energy Technologies, 2019•Elsevier*. Retrieved September 23, 2024, from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589299119300035

Kumar, S., Technologies, V. H.-M. S. for E., & 2019, undefined. (n.d.-b). Hydrogen production by PEM water electrolysis–A review. *ElsevierSS Kumar, V HimabinduMaterials Science for Energy Technologies, 2019•Elsevier*. Retrieved September 24, 2024, from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589299119300035

Kundu, M. K., Bhowmik, T., Mishra, R., & Barman, S. (2018). Platinum Nanostructure/Nitrogen-Doped Carbon Hybrid: Enhancing its Base Media HER/HOR Activity through Bi-functionality of the Catalyst. *ChemSusChem*, *11*(14), 2388–2401. https://doi.org/10.1002/CSSC.201800856

Lee, B., Lim, D., Lee, H., Reviews, H. L.-R. and S. E., & 2021, undefined. (n.d.). Which water electrolysis technology is appropriate?: Critical insights of potential water electrolysis for green ammonia production. *ElsevierB Lee, D Lim, H Lee, H LimRenewable and Sustainable Energy Reviews, 2021•Elsevier*. Retrieved September 23, 2024, from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121002550

Lee, D., Park, S., Yu, C., Ihm, S., Science, K. L.-J. of M., & 2008, undefined. (n.d.). Study on methanol reforming–inorganic membrane reactors combined with water–gas shift reaction and relationship between membrane performance and methanol. *ElsevierDW Lee, SJ Park, CY Yu, SK Ihm, KH LeeJournal of Membrane Science, 2008•Elsevier*. Retrieved October 5, 2024, from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376738808000112

Li, D., Liu, H., Fuels, L. F.-E. &, & 2020, undefined. (n.d.). A review on advanced FeNi-based catalysts for water splitting reaction. *ACS PublicationsD Li, H Liu, L FengEnergy & Fuels, 2020•ACS Publications*. Retrieved September 25, 2024, from https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.energyfuels.0c03084

Lim, D., Lee, B., Lee, H., Byun, M., Cho, H., … W. C.-E. C. and, & 2021, undefined. (n.d.). Impact of voltage degradation in water electrolyzers on sustainability of synthetic natural gas production: Energy, economic, and environmental analysis. *ElsevierD Lim, B Lee, H Lee, M Byun, HS Cho, W Cho, CH Kim, B Brigljević, H LimEnergy Conversion and Management, 2021•Elsevier*. Retrieved September 23, 2024, from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890421006920

Lindquist, G. A., Xu, Q., Oener, S. Z., & Boettcher, S. W. (2020). Membrane Electrolyzers for Impure-Water Splitting. *Joule*, *4*(12), 2549–2561. https://doi.org/10.1016/J.JOULE.2020.09.020/ASSET/081CEFB2-7B94-4B6B-BD9E-2FDCDF5D5065/MAIN.ASSETS/GR4.JPG

Liu, G., Xu, Y., Yang, T., & Jiang, L. (2023). Recent advances in electrocatalysts for seawater splitting. *Nano Materials Science*, *5*(1), 101–116. https://doi.org/10.1016/J.NANOMS.2020.12.003

López-Fernández, E., Gómez-Sacedón, C., Gil-Rostra, J., Espinós, J. P., González-Elipe, A. R., Yubero, F., & de Lucas-Consuegra, A. (2022). Ionomer-Free Nickel-Iron bimetallic electrodes for efficient anion exchange membrane water electrolysis. *Chemical Engineering Journal*, *433*, 133774. https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2021.133774

Luo, Y., Zhang, Z., Chhowalla, M., & Liu, B. (2022). Recent Advances in Design of Electrocatalysts for High-Current-Density Water Splitting. *Advanced Materials*, *34*(16). https://doi.org/10.1002/adma.202108133

Mayerhöfer, B., Ehelebe, K., Speck, F. D., Bierling, M., Bender, J., Kerres, J. A., Mayrhofer, K. J. J., Cherevko, S., Peach, R., & Thiele, S. (2021). On the effect of anion exchange ionomer binders in bipolar electrode membrane interface water electrolysis. *Journal of Materials Chemistry A*, *9*(25), 14285–14295. https://doi.org/10.1039/D1TA00747E

Milani, D., Kiani, A., Hydrogen, R. M.-I. J. of, & 2020, undefined. (n.d.). Renewable-powered hydrogen economy from Australia's perspective. *ElsevierD Milani, A Kiani, R McNaughtonInternational Journal of Hydrogen Energy, 2020•Elsevier*. Retrieved September 23, 2024, from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319920321789

Miller, H. A., Bouzek, K., Hnat, J., Loos, S., Bernäcker, C. I., Weißgärber, T., Röntzsch, L., & Meier-Haack, J. (2020). Green hydrogen from anion exchange membrane water electrolysis: a review of recent developments in critical materials and operating

conditions. *Sustainable Energy & Fuels*, *4*(5), 2114–2133. https://doi.org/10.1039/C9SE01240K

Mosca, L., Jimenez, J., Wassie, S., … F. G. journal of, & 2020, undefined. (2019). Process design for green hydrogen production. *ElsevierL Mosca, JAM Jimenez, SA Wassie, F Gallucci, E Palo, M Colozzi, S Taraschi, G Galdieriinternational Journal of Hydrogen Energy, 2020•Elsevier*. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.206

Navas-Anguita, Z., García-Gusano, D., … J. D.-S. of the total, & 2021, undefined. (2021). Revisiting the role of steam methane reforming with CO2 capture and storage for long-term hydrogen production. *ElsevierZ Navas-Anguita, D García-Gusano, J Dufour, D IribarrenScience of the Total Environment, 2021•Elsevier*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145432

Nikolaidis, P., reviews, A. P.-R. and sustainable energy, & 2017, undefined. (n.d.). A comparative overview of hydrogen production processes. *ElsevierP Nikolaidis, A PoullikkasRenewable and Sustainable Energy Reviews, 2017•Elsevier*. Retrieved September 23, 2024, from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116305366

Noussan, M., Raimondi, P. P., Scita, R., Hafner, M., Eni, F., & Mattei, E. (2020). The role of green and blue hydrogen in the energy transition—A technological and geopolitical perspective. *Mdpi.ComM Noussan, PP Raimondi, R Scita, M HafnerSustainability, 2020•mdpi.Com*. https://doi.org/10.3390/su13010298

Obata, K., & Takanabe, K. (2018). A Permselective CeOx Coating To Improve the Stability of Oxygen Evolution Electrocatalysts. *Angewandte Chemie*, *130*(6), 1632–1636. https://doi.org/10.1002/ANGE.201712121

pidjoe. (n.d.). *The Future of Hydrogen*.

Pinilla, A., Rodriguez, L., & Trujillo, R. (2009). Performance evaluation of Jepirachi Wind Park. *Renewable Energy*, *34*(1), 48–52. https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2008.04.015

Qiu, H. J., Ito, Y., Cong, W., Tan, Y., Liu, P., Hirata, A., Fujita, T., Tang, Z., & Chen, M. (2015). Nanoporous Graphene with Single-Atom Nickel Dopants: An Efficient and Stable Catalyst for Electrochemical Hydrogen Production. *Angewandte Chemie International Edition*, *54*(47), 14031–14035. https://doi.org/10.1002/ANIE.201507381

Rau, F., Herrmann, A., Krause, H., … D. F.-I. J. of, & 2019, undefined. (n.d.). Efficiency of a pilot-plant for the autothermal reforming of biogas. *ElsevierF Rau, A Herrmann, H Krause, D Fino, D TrimisInternational Journal of Hydrogen Energy, 2019•Elsevier*. Retrieved October 14, 2024, from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319918311066

Rodríguez-Fontalvo, D., Quiroga, E., Cantillo, N. M., Sánchez, N., Figueredo, M., & Cobo, M. (2024). Green hydrogen potential in tropical countries: The colombian case. *International Journal of Hydrogen Energy*, *54*, 344–360. https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2023.03.320

Santos, D. M. F., Sequeira, C. A. C., & Figueiredo, J. L. (2013). Hydrogen production by alkaline water electrolysis. *Química Nova*, *36*(8), 1176–1193. https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000800017

Shiva Kumar, S., & Lim, H. (2022). An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. *Energy Reports*, *8*, 13793–13813. https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2022.10.127

Shiva Kumar, S., Ramakrishna, S. U. B., Bhagawan, D., & Himabindu, V. (2018). Preparation of RuxPd1-xO2 electrocatalysts for the oxygen evolution reaction (OER) in PEM water electrolysis. *Ionics*, *24*(8), 2411–2419. https://doi.org/10.1007/S11581-017-2359-4/FIGURES/9

Shiva Kumar, S., Ramakrishna, S. U. B., Naga Mahesh, K., Rama Devi, B., & Himabindu, V. (2019). Palladium supported on phosphorus–nitrogen dual-doped carbon nanoparticles as cathode for hydrogen evolution in PEM water electrolyser. *Ionics*, *25*(6), 2615–2625. https://doi.org/10.1007/S11581-018-2783-0

Simoes, S. G., Catarino, J., Picado, A., Lopes, T. F., di Berardino, S., Amorim, F., Gírio, F., Rangel, C. M., & Ponce de Leão, T. (2021). Water availability and water usage solutions for electrolysis in hydrogen production. *Journal of Cleaner Production*, *315*, 128124. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.128124

Thangavel, P., Kim, G., & Kim, K. S. (2021). Electrochemical integration of amorphous NiFe (oxy)hydroxides on surface-activated carbon fibers for high-efficiency oxygen evolution in alkaline anion exchange membrane water electrolysis. *Journal of Materials Chemistry A*, *9*(24), 14043–14051. https://doi.org/10.1039/D1TA02883A

Tong, W., Forster, M., Dionigi, F., Dresp, S., Sadeghi Erami, R., Strasser, P., Cowan, A. J., & Farràs, P. (2020). Electrolysis of low-grade and saline surface water. *Nature Energy 2020 5:5*, *5*(5), 367–377. https://doi.org/10.1038/s41560-020-0550-8

Tosoni, S., Di Liberto, G., Matanovic, I., & Pacchioni, G. (2023). Modelling single atom catalysts for water splitting and fuel cells: A tutorial review. *Journal of Power Sources*, *556*, 232492. https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2022.232492

Villagra, A., & Millet, P. (2019). An analysis of PEM water electrolysis cells operating at elevated current densities. *International Journal of Hydrogen Energy*, *44*(20), 9708–9717. https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2018.11.179

Vörösmarty, C. J., McIntyre, P. B., Gessner, M. O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S. E., Sullivan, C. A., Liermann, C. R., & Davies, P. M. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature 2010 467:7315*, *467*(7315), 555–561. https://doi.org/10.1038/nature09440

Vos, J. G., Wezendonk, T. A., Jeremiasse, A. W., & Koper, M. T. M. (2018). MnOx/IrOx as Selective Oxygen Evolution Electrocatalyst in Acidic Chloride Solution. *Journal of the American Chemical Society*, *140*(32), 10270–10281. https://doi.org/10.1021/JACS.8B05382/ASSET/IMAGES/LARGE/JA-2018-05382Z_0013.JPEG

Wan, L., Liu, J., Xu, Z., Xu, Q., Pang, M., Wang, P., & Wang, B. (2022). Construction of Integrated Electrodes with Transport Highways for Pure-Water-Fed Anion Exchange Membrane Water Electrolysis. *Small*, *18*(21), 2200380. https://doi.org/10.1002/SMLL.202200380

Wang, M., Wang, Z., Gong, X., energy, Z. G.-R. and sustainable, & 2014, undefined. (n.d.). The intensification technologies to water electrolysis for hydrogen production–A review. *ElsevierM Wang, Z Wang, X Gong, Z GuoRenewable and Sustainable Energy Reviews, 2014•Elsevier*. Retrieved September 23, 2024, from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113006308

Wu, T., Xu, S., Zhang, Z., Luo, M., Wang, R., Tang, Y., Wang, J., & Huang, F. (2022). Bimetal Modulation Stabilizing a Metallic Heterostructure for Efficient Overall Water Splitting at Large Current Density. *Advanced Science*, *9*(25). https://doi.org/10.1002/ADVS.202202750

Wu, T., Xu, S., Zhang, Z., Luo, M., Wang, R., Tang, Y., Wang, J., Huang, F., Wu, T., Xu, S., Zhang, Z., Luo, M., Tang, Y., Wang, J., Huang, F., & Wang, R. (2022). Bimetal Modulation Stabilizing a Metallic Heterostructure for Efficient Overall Water Splitting at Large Current Density. *Advanced Science*, *9*(25), 2202750. https://doi.org/10.1002/ADVS.202202750

Xie, H., Zhao, Z., Liu, T., Wu, Y., Lan, C., Jiang, W., Zhu, L., Wang, Y., Yang, D., & Shao, Z. (2022). A membrane-based seawater electrolyser for hydrogen generation. *Nature 2022 612:7941*, *612*(7941), 673–678. https://doi.org/10.1038/s41586-022-05379-5

Xing, L., Shi, W., Su, H., Xu, Q., Das, P. K., Mao, B., & Scott, K. (2019). Membrane electrode assemblies for PEM fuel cells: A review of functional graded design and optimization. *Energy*, *177*, 445–464. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.04.084

Xu, S., Wu, Q., Lu, B. A., Tang, T., Zhang, J. N., & Hu, J. S. (2023). Recent Advances and Future Prospects on Industrial Catalysts for Green Hydrogen Production in Alkaline

Media. *Wuli Huaxue Xuebao/ Acta Physico - Chimica Sinica*, *39*(2), 1–26. https://doi.org/10.3866/PKU.WHXB202209001

Yang, Q., Jiang, Y., Zhuo, H., Mitchell, E. M., & Yu, Q. (2023). Recent progress of metal single-atom catalysts for energy applications. *Nano Energy*, *111*, 108404. https://doi.org/10.1016/J.NANOEN.2023.108404

Yeo, K., Lee, K., Kim, H., Lee, J., Environmental, S. K.-E. &, & 2022, undefined. (2022). A highly active and stable 3D dandelion spore-structured self-supporting Ir-based electrocatalyst for proton exchange membrane water electrolysis fabricated using. *Pubs.Rsc.OrgKR Yeo, KS Lee, H Kim, J Lee, SK KimEnergy & Environmental Science, 2022•pubs.Rsc.Org*, *15*(8), 3449–3461. https://doi.org/10.1039/D2EE01042A

Yodwong, B., Guilbert, D., Phattanasak, M., Kaewmanee, W., Hinaje, M., & Vitale, G. (n.d.). AC-DC converters for electrolyzer applications: State of the art and future challenges. *Mdpi.ComB Yodwong, D Guilbert, M Phattanasak, W Kaewmanee, M Hinaje, G VitaleElectronics, 2020•mdpi.Com*. https://doi.org/10.3390/electronics9060912

Yu, F., Yu, L., Mishra, I., Yu, Y., Ren, Z., Physics, H. Z.-M. T., & 2018, undefined. (n.d.). Recent developments in earth-abundant and non-noble electrocatalysts for water electrolysis. *ElsevierF Yu, L Yu, IK Mishra, Y Yu, ZF Ren, HQ ZhouMaterials Today Physics, 2018•Elsevier*. Retrieved September 24, 2024, from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542529318301469

Yu, J. (2021). A General Route via Carbon Quantum Dots Assembled to Prepare Ruthenium Based Bimetals Electrocatalysts for pH-Universal Hydrogen Evolution Reaction. *Chinese Journal of Inorganic Chemistry*, *37*(7). https://doi.org/10.3866/PKU.WHXB202011004

Yue, M., Lambert, H., Pahon, E., Roche, R., … S. J.-… and S. E., & 2021, undefined. (n.d.). Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges. *ElsevierM Yue, H Lambert, E Pahon, R Roche, S Jemei, D HisselRenewable and Sustainable Energy Reviews, 2021•Elsevier*. Retrieved September 23, 2024, from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121004688

Zakaria, Z., & Kamarudin, S. K. (2021). A review of alkaline solid polymer membrane in the application of AEM electrolyzer: Materials and characterization. *International Journal of Energy Research*, *45*(13), 18337–18354. https://doi.org/10.1002/ER.6983

Zeng, K., science, D. Z.-P. in energy and combustion, & 2010, undefined. (n.d.). Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *ElsevierK Zeng, D ZhangProgress in Energy and Combustion Science, 2010•Elsevier*. Retrieved November 18, 2024, from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128509000598

Zhang, X. Y., Yu, W. L., Zhao, J., Dong, B., Liu, C. G., & Chai, Y. M. (2021). Recent development on self-supported transition metal-based catalysts for water electrolysis at large current density. *Applied Materials Today*, *22*, 100913. https://doi.org/10.1016/J.APMT.2020.100913

ANH
AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS

Innovaciones tecnológicas en CATALIZADORES y MEMBRANAS

Informe técnico

