

ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO POR  
CELDAS DE ELECTRÓLISIS ALCALINA DE AGUA

Wilmer Andrés Quiroga Mancipe

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Sergio Ismael Blanco Vásquez

PhD en ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímica

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales

Bucaramanga

2024

### **Dedicatoria**

Dedico esta tesis con todo mi corazón a mis padres, quienes han sido pilares fundamentales en mi vida y en la culminación de mis estudios. A mi madre, Milena Mancipe, por su inquebrantable compañía e insistencia, siempre motivándome a dar lo mejor de mí y a no rendirme jamás. A mi padre, Wilmer Quiroga, por ser un ejemplo constante de responsabilidad y amor familiar, mostrando con su vida el verdadero significado de la dedicación y el compromiso.

A mis queridos abuelos, Martha, José (QEPD), Celmira y Bernabé, quienes con su apoyo incondicional y sabiduría han dejado una huella imborrable en mi vida. Su amor y consejos siempre serán una fuente de inspiración para mí.

A toda mi familia, por su ayuda y apoyo constante en cada etapa de mi vida académica. Sin su aliento y respaldo, no hubiera sido posible llegar hasta aquí.

A mi pareja y colega, Elizabeth Ruíz, quien me impulso a continuar, cuyo amor, guía y compañerismo han sido invaluable durante toda la realización de mi carrera. Gracias por estar siempre a mi lado, brindándome tu apoyo y compartiendo conmigo cada triunfo y cada desafío. Tu ayuda ha sido fundamental para alcanzar este logro.

Y sin duda alguna, a mi fiel compañera Charlotte Sofía, mi perrita, quien ha estado a mi lado en innumerables noches de desvelo, acompañándome en la realización de clases, talleres y trabajos. Su compañía incondicional y su amor inagotable han sido un bálsamo en los momentos de estrés y fatiga.

Finalmente, a mis amigos, quienes han estado siempre a mi lado, ofreciendo su apoyo y amistad incondicional.

*Andres Quiroga*

### **Agradecimientos**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Doctor Sergio Ismael Blanco, cuyo inigualable acompañamiento, paciencia y dedicación han sido fundamentales para la realización de esta tesis. Su orientación técnica y apoyo constante no solo han enriquecido este trabajo, sino que también han fomentado mi crecimiento personal y profesional. Su compromiso con la excelencia y su disposición para compartir su vasto conocimiento han sido inspiradores y determinantes para el éxito de esta investigación.

Al semillero de Investigación en Recubrimientos Multifuncionales, por sus conocimientos y gran disciplina.

Asimismo, extendiendo mi gratitud a la Universidad Industrial de Santander y, en particular, a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica por su apoyo continuo durante toda mi formación académica y profesional. El acompañamiento brindado por la escuela y la dedicación de todos los docentes de calidad han sido cruciales para mi desarrollo y han cultivado en mí una pasión profunda por esta hermosa profesión. Gracias por proporcionarme un entorno académico de excelencia y por inspirarme a perseguir siempre la mejora y el conocimiento.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	9
1. Objetivos .....	11
2.1 Objetivo General .....	11
2.2 Objetivos Específicos.....	11
2. Metodología .....	12
2.1 Revisión bibliográfica.....	12
2.2 Clasificación de la información .....	12
2.3 Comparación de celdas utilizadas para electrolisis alcalina de agua .....	12
2.4 Análisis de factibilidad .....	13
3. Discusión y resultados .....	13
3.1 Generalidades de la electrolisis alcalina del agua en la producción de hidrógeno .....	13
3.2 Celdas AWE para la producción de hidrógeno.....	19
3.3 Integración de energías renovables .....	22
3.4 Diseño de electrolizadores .....	29
3.5 Electrocatalizadores alternativos .....	40
3.6 Matriz de comparación .....	44
3.7 Análisis de factibilidad .....	47
4. Conclusiones .....	50
5. Recomendaciones .....	51
Referencias Bibliográficas .....	52

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Comparativa de uso de energías renovables en AWE</i> .....	23
Tabla 2 <i>Comparativa diseño de celdas</i> .....	30
Tabla 3 <i>Propiedades materiales celda Zero-Gap</i> .....	35
Tabla 4 <i>Comparativa de electrocatalizadores</i> .....	40
Tabla 5 <i>Matriz comparativa de conceptos</i> .....	46

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>El Pantone del hidrógeno</i> .....	14
Figura 2 <i>Celda de electrolisis</i> .....	16
Figura 3 <i>Diagrama de Pourbaix para el agua</i> .....	19
Figura 4 <i>Esquema de celda AWE</i> .....	21
Figura 5 <i>Esquema AWE con panel fotovoltaico</i> .....	25
Figura 6 <i>Esquema PV-LIB-AWE</i> .....	27
Figura 7 <i>Estructura RMH</i> .....	33
Figura 8 <i>Esquema Zero-Gap</i> .....	36
Figura 9 <i>Esquema AEMWE</i> .....	39
Figura 10 <i>Diagrama de volcán para la reacción de evolución de hidrogeno.</i> .....	42
Figura 11 <i>Esquema estructural de un sistema de electrolisis alcalina del agua</i> .....	48

## Resumen

**Título:** Estudio del estado del arte para la producción de hidrógeno por celdas de electrólisis alcalina de agua\*

**Autor:** Wilmer Andres Quiroga Mancipe\*\*

**Palabras Clave:** Diseño de celdas, electrolizadores, electrolisis alcalina, electrocatalizadores, hidrogeno verde.

**Descripción:** El presente estudio aborda la comparación de diseños de celdas para la electrólisis alcalina del agua, con el objetivo de identificar tecnologías viables y avanzadas. Se realizó una revisión bibliográfica detallada de los diseños de celdas existentes, categorizándolos según sus componentes, aplicaciones y contribuciones específicas. Esta clasificación permitió identificar las tendencias y desafíos en la implementación de estos sistemas.

Mediante matrices comparativas de conceptos, se evaluó la viabilidad técnica y económica de las distintas soluciones. La comparación reveló que los enfoques más prometedores se centran en tres áreas críticas: la integración de energías renovables para la alimentación de los electrolizadores, el desarrollo de electrolizadores compactos de múltiples celdas para optimizar la eficiencia y reducir costos, y la investigación en electrocatalizadores alternativos que mejoren el rendimiento y la durabilidad.

Adicionalmente, se realizó un estudio de factibilidad para un nuevo diseño de celda de electrólisis alcalina. Este diseño busca mejorar la eficiencia operativa y contribuir a los objetivos estratégicos de la ruta del hidrógeno, promoviendo una producción de hidrógeno más sostenible y económica. Los resultados proporcionan una perspectiva integral sobre los enfoques actuales y futuros en la electrólisis alcalina del agua, destacando prácticas óptimas y áreas clave para el desarrollo tecnológico.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingeniería Físicoquímica. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Pregrado. Director: Sergio Ismael Blanco Vásquez. PhD en Ingeniería.

## Abstract

**Title:** State-of-the-art study for hydrogen production by alkaline water electrolysis cells \*

**Author(s):** Wilmer Andres Quiroga Mancipe \*\*

**Key Words:** Cell design, electrolyzers, alkaline electrolysis, electrocatalysts, green hydrogen.

**Description:** This study compares various cell designs for alkaline water electrolysis to identify advanced and viable technologies. An extensive literature review was conducted, categorizing existing cell designs based on their components, applications, and specific contributions. This classification identified trends and challenges in the implementation of these systems.

Using comparative concept matrices, the technical and economic viability of different solutions was evaluated. The analysis revealed that the most promising approaches focus on three critical areas: the integration of renewable energies to power electrolyzers, the development of compact multi-cell electrolyzers to optimize efficiency and reduce costs, and research into alternative electrocatalysts to enhance performance and durability.

Additionally, a feasibility study was conducted for a new cell design for alkaline water electrolysis. This design aims to improve operational efficiency and contribute to the strategic goals of the hydrogen roadmap, promoting more sustainable and economical hydrogen production. The results provide a comprehensive perspective on current and future approaches in alkaline water electrolysis, highlighting optimal practices and key areas for technological development.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physical and Chemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Undergraduate. Director: Sergio Ismael Blanco Vásquez. PhD in Engineering

## Introducción

Históricamente, el ser humano se ha radicado en una dependencia masiva en los combustibles fósiles, como lo son el petróleo, el carbón y el gas natural, estos han sido ampliamente utilizados en producción de electricidad, transporte, calor industrial o incluso en usos domésticos como cocción de alimentos y calefactores. Sin embargo, el uso desmedido y dependencia ha llevado al agotamiento de estos recursos finitos, como a su vez problemas ambientales (contaminación del aire, cambio climático) y de salud como enfermedades respiratorias (Greenpeace México, n.d.). Como bien lo confirma el Banco Mundial en múltiples foros “Las carencias persisten: 675 millones de personas en el mundo no tienen electricidad y 2300 millones usan combustibles nocivos para cocinar” (Banco mundial, 2023), es así como surge la necesidad de diversificar la fuente de generación de energía a nivel mundial. En el contexto colombiano, desde la firma del acuerdo de París en 2015 para lograr los objetivos pactados se decide la creación de una “ruta del hidrógeno” (Ministerio de minas y energía, s. f.) con el apoyo del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) en la cual se plantea la base de una economía descarbonizada y se ve al hidrógeno como prometedor vector energético, ya que permite almacenar y transportar energía de forma eficiente y sostenible.

Para lograr la transición energética y la disminución en el impacto ambiental y de salud es necesario emplear energías renovables totalmente limpias. Es así, como actualmente se manejan distintos colores de hidrógeno clasificándolos de acuerdo con su proceso de producción u obtención: Negro y marrón (gasificación del carbón), gris y azul (extracción con vapor), turquesa (pirolisis) y verde (electrolisis). Es este último, el hidrógeno verde, también llamado hidrógeno renovable el que tiene la forma de producción más ecológica comparado a los otros tipos de

colores, ya que no produce emisiones contaminantes, convirtiéndola en una de las opciones más atractivas para la transición energética (Ministerio de minas y energía, s. f.). El hidrógeno verde, es producido a partir de una celda electrolítica que mediante electricidad busca dividir el agua en sus componentes más básicos como lo son el hidrógeno y el oxígeno, este proceso es conocido como electrólisis del agua. Este implica grandes desafíos a nivel industrial pues el volumen de consumo que se requerirá de hidrógeno será elevado y se requiere su producción a bajo costo. Queriendo dar solución a esta demanda, en el presente proyecto se plantea realizar una comparación exhaustiva de diseños de celdas para producción de hidrógeno que logre identificar el diseño más eficiente existente hasta el momento.

Finalmente, en este proyecto se realiza un estudio comparativo de celdas de producción de hidrógeno mediante electrólisis alcalina del agua que permita proyectar el diseño más eficiente de producción de hidrógeno.

## **1. Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Realizar un estudio comparativo de diseños de celdas utilizadas para la electrólisis alcalina del agua.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Revisión bibliográfica de diseños de celda utilizadas para la electrólisis alcalina del agua.

Comparación de celdas utilizadas para la electrólisis alcalina del agua mediante matrices comparativas de conceptos.

Estudio de factibilidad en la creación de un diseño de celda utilizada para la electrólisis alcalina del agua.

## **2. Metodología**

A continuación, se expone la metodología empleada durante el desarrollo del proyecto, con el objetivo de proporcionar una guía detallada de los pasos ejecutados.

### **2.1 Revisión bibliográfica**

Con el objetivo de obtener una comprensión sólida de la literatura científica existente sobre la electrolisis alcalina del agua, sus aplicaciones, tecnologías, y resultados previos de investigación. Se realizó una búsqueda exhaustiva en bases de datos académicas, revistas científicas y libros relevantes, utilizando las bases de datos y plataformas disponibles en la Biblioteca Central de la Universidad Industrial de Santander. Se recopiló y analizó la información relevante enfocadas principalmente en celdas utilizadas para la electrolisis alcalina del agua.

### **2.2 Clasificación de la información**

Con ayuda de un gestor bibliográfico como el software Mendeley, se clasificó debidamente las referencias bibliográficas de las diferentes celdas encontradas, considerando su relevancia, contenido y calidad del tema, para así considerar la información necesaria para abordar cada uno de los objetivos propuestos en el presente trabajo de investigación.

### **2.3 Comparación de celdas utilizadas para electrolisis alcalina de agua**

Se realizó una evaluación de diferentes tipos de celdas utilizadas en la electrolisis alcalina del agua para identificar ventajas y desventajas.

La principal característica que se buscó en esta investigación es la selección de una celda eficiente para la producción de hidrógeno, por lo cual, este factor es predominante al momento de elegir las celdas con las que se realizaron una comparación más minuciosa. Se tuvo también en

cuenta, un análisis detallado de los componentes de las celdas alcalinas y eficiencia energética y se comparó estos costos con los beneficios potenciales de la producción de hidrógeno.

#### **2.4 Análisis de factibilidad**

Por medio de análisis cualitativos a través de una matriz de comparación de conceptos, se evaluó la factibilidad y eficiencia de tecnologías de celdas con visión de ser potencial para la producción de hidrógeno a escala industrial, brindando así recomendación de hacia dónde enfocar posteriores investigaciones de evaluación de producción de hidrógeno por electrolisis alcalina del agua.

### **3. Discusión y resultados**

#### **3.1 Generalidades de la electrolisis alcalina del agua en la producción de hidrógeno**

Como contexto, La transición energética mundial representa una respuesta necesaria y urgente para abordar los desafíos del cambio climático, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la disminución de la dependencia de combustibles fósiles altamente contaminantes que a su vez tienen la limitante de ser recursos no renovables. Por lo anterior, la adopción de un modelo energético más sostenible a partir de fuentes no convencionales se ha convertido en una prioridad a nivel global, la Agencia Internacional de Energía (AIE) y la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) prevén que el hidrógeno satisfaga el 12%–13% de la demanda final de energía para 2050, con un aumento desde prácticamente cero en la actualidad (La Década Del Hidrógeno, n.d.).

El hidrógeno es altamente atractivo en el campo de la energía dada su versatilidad, capacidad de ser una fuente energía limpia y su potencial para abordar desafíos energéticos y

medioambientales. En tan solo los últimos cinco años, más de 30 países han puesto en marcha o comenzado a preparar estrategias nacionales de hidrógeno (IEA, 2022). El hidrógeno es el elemento más abundante del universo, pero existen numerosos tipos en función de la fuente de energía que se use para procesarlo (EOM, n.d.), como se observa en la figura 1, existe una clasificación a nivel mundial del hidrógeno, de acuerdo con su forma de obtención.

**Figura 1**

*El Pantone del hidrógeno*



*Nota.* Muestra la clasificación por color según la tecnología empleada en la producción del hidrógeno. Autor: Álvaro Merino, 2022

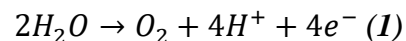
De los métodos mencionados, el reformado de vapor con metano es el método industrial más usado en producción de hidrógeno por su gran potencial de comercialización. No obstante, requiere de mucha energía y genera grandes emisiones de carbono, por lo que producir hidrógeno de manera electrocatalítica por la descomposición de agua empieza a generar gran inclinación por su alta pureza en un proceso sostenible de obtención (Gong, Y et al., 2022).

Es así como el hidrógeno verde es considerado la opción más sostenible, importante y prometedor para un futuro más limpio para el proceso de descarbonización (Li, J. 2021). Tanto es así que el gobierno colombiano ha decidido impulsar la creación de una ruta de hidrógeno como parte de su estrategia para forzar la transformación de las fuentes de energía en el país.

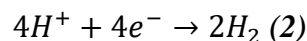
La electrolisis es un proceso químico en la cual se emplea una corriente eléctrica para producir una reacción química no espontánea. Esta se da en una celda electroquímica como la que se encuentra esquematizada en la figura 2, en la que una corriente eléctrica pasa a través de una solución, provocando la descomposición de los compuestos químicos presentes en la solución. Para esto se puede utilizar medio alcalino o medio ácido. En el caso de la electrolisis del agua, se aplica corriente continua (CC) para mantener el equilibrio eléctrico y los electrones fluyen del terminal negativo de la fuente CC hasta el cátodo en el que los iones de hidrógeno (protones) consumen electrones para formar hidrógeno gaseoso (Zeng K & Zhang D, 2010)

Las celdas electroquímicas generalmente están compuestas por:

- Electrodo positivo que se comporta como ánodo donde ocurre la oxidación, es decir, libera electrones durante la reacción química.



- Electrodo negativo que se comporta como cátodo donde ocurre la reducción, es decir, acepta los electrones durante la reacción química.



- Electrolito que permite el flujo de iones entre el ánodo y el cátodo. Es una sustancia iónica.
- Conductor externo, conecta el ánodo y el cátodo con la fuente de energía y permite que los electrones fluyan desde el ánodo al cátodo.

**Figura 2***Celda de electrolisis*

*Nota.* Tomado de Hidrógeno Verde Servicios de Ingeniería y Consultoría | IDEAGREEN, n.d.

La eficiencia energética en la producción de hidrógeno es uno de los aspectos más críticos en el diseño de celdas, pues muestra cuanta energía debe ser invertida para obtener un cierto volumen o masa de hidrógeno. Si el proceso tiene baja eficiencia implica altos costos de producción limitando la viabilidad e implementación a gran escala de la tecnología. Dentro de las metas que se establecen en la hoja de ruta del hidrógeno con la implementación del hidrógeno, resalta el hecho de alcanzar un costo aproximado de US\$1,7 por kilogramo de hidrógeno verde. Para esto, la celda debe tener una alta eficiencia energética para ser deseable, sostenible y económicamente viable.

En la expresión de eficiencia, se debe tener en cuenta que para que el proceso ocurra se debe vencer varias barreras como las resistencias eléctricas y los sobrepotenciales o energía de

activación y transporte desde la superficie de los electrodos hacia el exterior de los gases formados. Para esto se tiene en cuenta la cinética y termodinámica de las reacciones presentes.

La ley de Faraday es crucial, pues es una de las leyes fundamentales de la electroquímica y es descrita como la corriente eléctrica que puede inducir una reacción química. Es formulada por Michael Faraday en el siglo XIX, en la que establece la cantidad de sustancia liberada o depositada durante una reacción de electrólisis, es directamente proporcional a la cantidad de carga eléctrica que pasa a través de la celda. Principalmente la ley de Faraday esta expresada en la ecuación (3), donde  $Q$  es la carga eléctrica en culombios,  $\eta$  es la cantidad de sustancia liberada o depositada y  $F$  es la constante de Faraday (Electrochemical Methods, 2022).

$$Q = \eta F \quad (3)$$

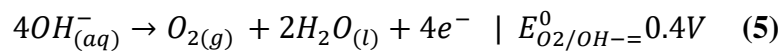
La constante de Faraday ( $F$ ), es una cantidad fundamental en física y química. Donde un mol de electrones transporta una carga de 96485 C, siendo clave en muchos cálculos electroquímicos.

El potencial estándar, el cual representa el voltaje mínimo para que comience la reacción se muestra en la ecuación (4) descubierta por Nerst. Donde  $E$ , es el potencial del electrodo corregido,  $E^0$  potencial en condiciones estándar,  $R$  constante de los gases,  $T$  temperatura de operación,  $n$  la cantidad de moles de electrones que intervienen en la reacción,  $F$  constante de Faraday y  $Q$  constante de equilibrio termodinámico.

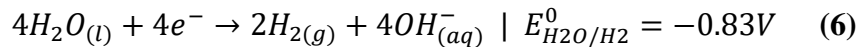
$$E = E^0 - (R * T / n * F) * \ln Q \quad (4)$$

Para la electrolisis del agua se obtiene a partir de los potenciales de las semirreacciones (Kelly, 2014). De acuerdo con el medio en el que se produzca la electrolisis las semirreacciones en los electrodos varían, como el interés en esta investigación es en medio alcalino, a continuación, se presentan las reacciones y su potencial estándar.

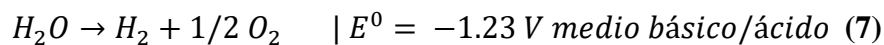
- Semirreacción ánodo



- Semirreacción cátodo



- Reacción global



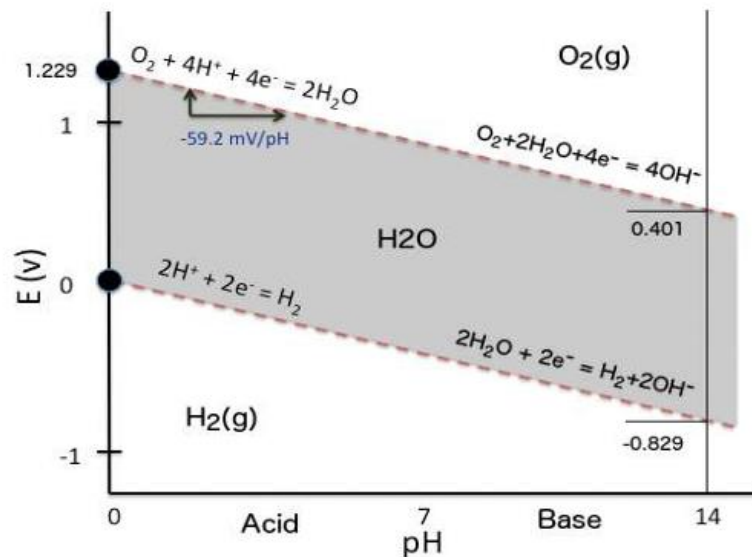
Además, el sentido de la evolución de la reacción está dado por la variación de funciones termodinámicas como la energía libre de Gibbs ( $\Delta G$ ), la cual indica la condición de equilibrio y espontaneidad del proceso. Para la electrolisis del agua (Zoulias and Varkaraki, 2004) se tienen el siguiente valor  $\Delta G = 237.2$  kJ/mol.

Como se ve en la ecuación global (7), el potencial es el mismo sin tener en cuenta el medio, en este caso el signo negativo indica que el proceso no es espontáneo y se debe aportar energía para iniciar dicha reacción. Los diagramas Pourbaix, son una representación gráfica del potencial en función del pH para un metal dado bajo condiciones termodinámicas estándar, y traza el equilibrio de fases en el sistema electroquímico acuoso. En la Figura 3 aparece el diagrama de Pourbaix para el caso del agua, indicando las reacciones y los potenciales que tienen lugar según el pH en el que se encuentre la disolución. Las dos líneas discontinuas corresponden al equilibrio de descomposición del agua con desprendimiento de oxígeno e hidrógeno, respectivamente y la región entre las dos líneas es la zona donde el agua es estable con respecto al oxígeno y al hidrógeno (Pourbaix, NACE International). Por encima de la línea se presenta condiciones oxidantes, el agua se descompone por desprenderse oxígeno en forma de gas. Mientras que, por

debajo de la línea se presentan condiciones reductoras, el agua se descompone por reacción de los protones generando  $H_2$  en forma de hidrógeno gaseoso.

### Figura 3

*Diagrama de Pourbaix para el agua*



*Nota. Adaptado de Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions.*

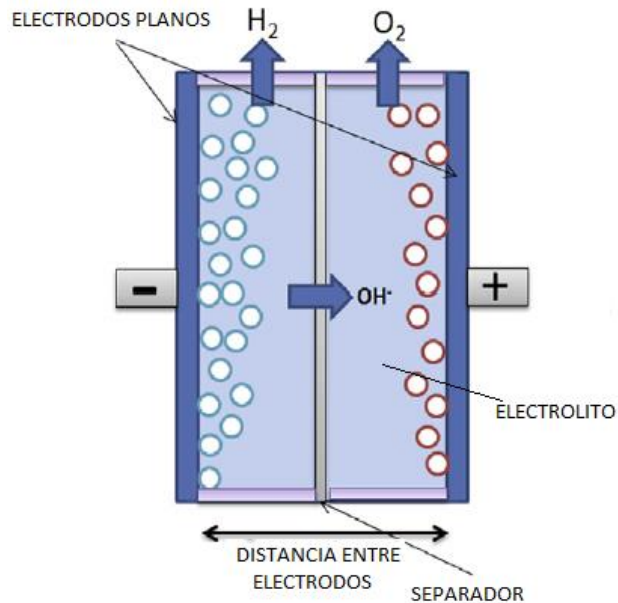
Es así como finalmente, a partir de estos valores se calcula teóricamente el valor de voltaje mínimo necesario de la celda, es decir, en el momento que, a una disolución de agua líquida, a 298 K y 1 bar de presión se le aplican 1.23 V, se cumple el requisito energético y el agua comienza a descomponerse e inicia la formación de hidrógeno y oxígeno; los cuales han servido como punto de partida para todas las investigaciones relacionadas al hidrógeno.

### 3.2 Celdas AWE para la producción de hidrógeno

La producción de hidrógeno mediante celdas de electrólisis alcalina de agua o AWE (por sus siglas en inglés “Alkaline Water Electrolysis”), representa una tecnología clave en el desarrollo

de nuevas energías limpias. A grandes rasgos lo que este proceso realiza es la descomposición de agua en hidrógeno y oxígeno mediante el uso de una corriente eléctrica. De 1 mol de agua logra producir 1 mol de  $H_2$  y 0.5 mol de  $O_2$  aproximadamente (Guo et al., 2022), a pesar de su potencial significativo, actualmente solo contribuye con un 4% a la producción global de hidrógeno. Sin embargo, su importancia radica en la capacidad de generar hidrógeno sin emisiones directas de dióxido de carbono, lo que la convierte en una opción prometedora para reducir la dependencia de combustibles fósiles y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. El hidrógeno es altamente atractivo como fuente de energía ya que posee aproximadamente tres veces más poder calorífico que combustibles convencionales como la gasolina (de Fátima Palhares et al., 2018) Esto lo hace altamente atractivo para aplicaciones a nivel industrial en las que se requieren altas demandas energéticas.

Las celdas AWE presentan distintos diseños dependiendo de la eficiencia, la aplicación y el volumen de hidrogeno que se necesite producir, es por esto por lo que la figura presenta un esquema simplificado de las celdas, destacando sus componentes principales.

**Figura 4***Esquema de celda AWE*

*Nota. Tomado de International Journal of Hydrogen Energy | Phillips et al.*

Un electrolito alcalino para facilitar el transporte eficiente de iones  $OH^-$  entre los electrodos y asegurar una operación sostenida y eficiente del proceso de electrolisis. Además, actúa como un medio para mantener la neutralidad eléctrica en la celda, y así se garantiza que las reacciones de oxidación y reducción ocurran de manera equilibrada.

Un separador el cual suele ser de un material poroso para evitar la mezcla de los gases generados en cada electrodo. Este aislamiento es esencial para prevenir la recombinación de los gases, lo que no solo incrementaría las pérdidas de eficiencia, sino que también podría dar lugar a situaciones peligrosas debido a la alta reactividad de una mezcla de hidrógeno y oxígeno.

Un sistema de suministro de energía responsable de proporcionar la corriente continua necesaria para impulsar las reacciones de electrolisis. Este sistema debe ser capaz de mantener una

corriente estable y ajustada a las necesidades de la celda para maximizar la eficiencia del proceso. Este sistema se caracteriza por asignar una parte significativa de los recursos financieros en el diseño de la celda de electrolisis alcalina del agua.

Dos electrodos que se comportan como cátodo (ocurre la reducción del agua para producir hidrógeno gaseoso e iones  $\text{OH}^-$ ) y ánodo (ocurre la oxidación del agua para producir oxígeno gaseoso y liberar electrones), los cuales están fabricados con materiales conductores para lograr catalizar las reacciones de electrólisis. Mediante estos parámetros se estableció la clasificación de los artículos científicos estudiados, y es por ello que el primer factor a evaluar es el uso de energías renovables para la producción de hidrógeno completamente verde.

### **3.3 Integración de energías renovables**

La integración de energías renovables, como la solar, eólica e hidroeléctrica, en el proceso de electrólisis alcalina es esencial para asegurar que el hidrógeno generado sea verdaderamente sostenible y no contribuya a la huella de carbono global. En este contexto, la Tabla 1 presenta un análisis general y detallado de la información proporcionada por cada artículo revisado, destacando los enfoques y resultados obtenidos en la implementación de energías renovables en la producción de hidrógeno.

**Tabla 1***Comparativa de uso de energías renovables en AWE*

<i>Titulo</i>	<i>Resumen</i>	<i>Implementos</i>	<i>Contribución</i>
<b>Mejora de la eficiencia y la consistencia de los electrolizadores alcalinos accionados por fuentes de energía renovables</b>  (Xia et al., 2023)	Aborda los desafíos de rendimiento de los electrolizadores alcalinos impulsados por fuentes de energía renovables mediante una estrategia innovadora de auto-optimización multi-modo. La cual permite al sistema ajustar dinámicamente sus parámetros en función de las condiciones cambiantes, como la carga de trabajo y la disponibilidad de energía, mejorando así la eficiencia y consistencia del dispositivo en tiempo real.	Sistema con cuatro celdas de placas bipolares fabricadas en acero inoxidable, seleccionado por su alta resistencia, durabilidad y un diseño que optimiza el rendimiento electroquímico. Electrolito compuesto por una solución acuosa de KOH 30%wt; y alimentado por una fuente de corriente continua para proporcionar un voltaje estable y controlado a todo el sistema.	Esta estrategia casi duplica la eficiencia de los electrolizadores y amplía su rango de operación, facilitando la producción de hidrógeno a partir de energía renovable. Se destaca que la eficiencia del sistema aumenta de 15.36% a 29.78% bajo una carga de 500 W con respecto al suministro convencional de energía de corriente continua.
<b>Producción de hidrógeno mediante un electrolizador de bajo coste desarrollado mediante la combinación de la electrólisis del agua alcalina y el aprovechamiento de la energía solar.</b>  (de Fátima Palhares et al., 2018)	Se enfoca en la producción eficiente de hidrógeno mediante un sistema integrado de electrolizador de bajo costo combinado con energía solar fotovoltaica, en el que se busca demostrar la viabilidad de esta tecnología para obtener hidrógeno de manera limpia y sostenible. Además, se identificó que la nubosidad afectó directamente la producción de gas al disminuir la corriente eléctrica del sistema	Celda cilíndrica fabricada en acrílico con dos electrodos de acero inoxidable 304 y un electrolito de 5,0 moles·litro <sup>-1</sup> de NaOH. Para suministrar la energía necesaria, se empleó un panel fotovoltaico de 20W. El diseño experimental también incluyó un medidor de irradiancia solar para monitorear la radiación incidente, así como colectores de hidrógeno y oxígeno para la recolección de gases.	La eficiencia del sistema se situó entre el 1,13% y el 1,15%, con una producción estable de aproximadamente 2 litros de hidrógeno en 4 horas de operación a una irradiancia promedio de 800,0 Wm <sup>-2</sup> . Además, la determinación de la concentración óptima de NaOH y la identificación de la influencia de la nubosidad en la producción de hidrógeno proporcionan información valiosa para la optimización de procesos electroquímicos.

<b>Electrólisis de agua alcalina impulsada por energía solar con catalizadores multifuncionales</b>	Investiga un sistema con electrodos multifuncionales, que se emplean tanto para el almacenamiento de energía en la batería de iones de litio como para las reacciones de evolución de oxígeno (OER) y evolución de hidrógeno (HER) durante la electrólisis, para mejorar la eficiencia y rentabilidad de este proceso.	El sistema está compuesto por celdas fotovoltaicas (PV) que cargan una batería de iones de litio (LIB). La batería alimenta un dispositivo de electrólisis de agua alcalina (AWE), utilizando electrodos multifuncionales de óxido de níquel poroso decorado con carbono dopado con nitrógeno (p-NiO@NC) tanto para el almacenamiento de energía como para la electrólisis. El electrolito en la LIB es sal de litio en disolvente orgánico.	El desarrollo de un sistema integrado PV-LIB-AWE aborda y supera las limitaciones de la intermitencia de la energía renovable, proporcionando una solución viable para la producción sostenible de hidrógeno. Los electrodos multifuncionales de p-NiO@NC ofrecen una alta capacidad de almacenamiento de energía y una excelente eficiencia en las reacciones de OER y HER, lo que mejora significativamente la estabilidad y eficiencia del proceso de electrólisis.
---	--	--	--

(Sun et al., 2020)

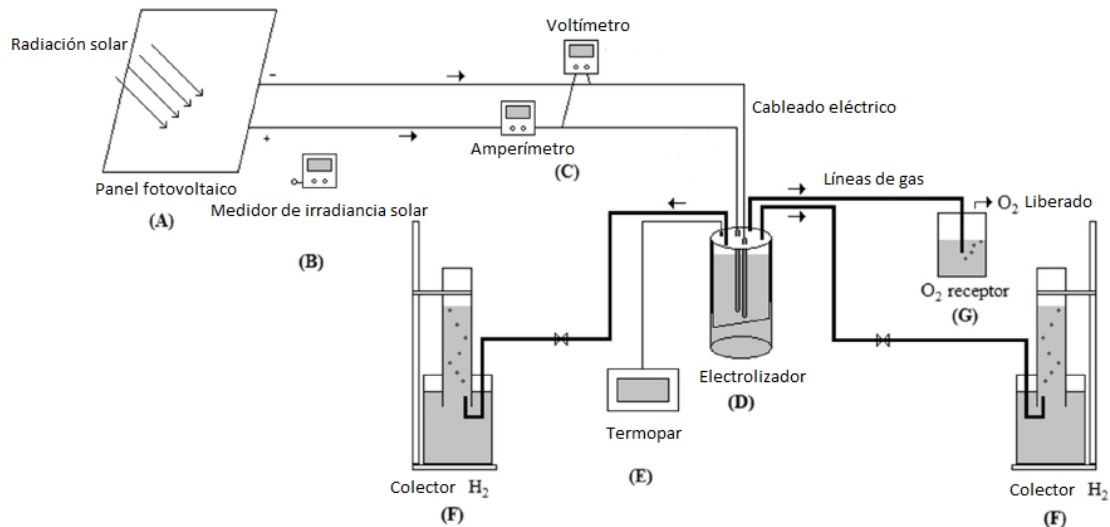
De Fátima Palhares et al, plantean la implementación de un panel fotovoltaico para el correcto funcionamiento de la celda. Sin embargo, hay que tener en cuenta que, para lograr un aumento en la eficiencia de la celda, se deben aplicar dos métodos principales. El primero consiste en una reducción termodinámica de la energía requerida para que ocurra la reacción, lo cual se logra elevando las condiciones del sistema, como la presión y la temperatura. El segundo método implica minimizar las pérdidas de energía en la celda electrolítica, lo cual se consigue incrementando la conductividad del electrolito.

En este contexto, uno de los mayores desafíos encontrados al implementar este método se debe a la intermitencia de la energía solar, lo que provoca la inducción de tensiones mecánicas y químicas. Estas tensiones no solo afectan la producción de hidrógeno, sino que también generan daños prematuros en el electrolizador. El diseño de la celda electrolítica consiste en una celda cilíndrica fabricada en acrílico, con un diámetro de 7.3 cm y una longitud total de 10.5 cm. En la

parte superior, cuenta con un orificio para la conexión de un termopar que permite obtener una medida precisa de la temperatura del sistema, dos salidas de hidrógeno que son alternadas dependiendo del nivel de llenado del contenedor de hidrógeno y una salida de oxígeno que es liberado a la atmósfera. En la parte inferior del reactor, se utiliza una junta tórica para lograr un sello hermético. Los electrodos son cilíndricos y están fabricados en acero inoxidable 304, con un diámetro de 3/8 pulgadas y una longitud de 135 mm. Además, se emplea un diafragma de 138 mm de longitud, un electrolito conductor y un panel fotovoltaico de 20 W, que se activa en un período de 10:00 am a 2:00 pm, como se observa en la figura 5.

### Figura 5

*Esquema AWE con panel fotovoltaico*

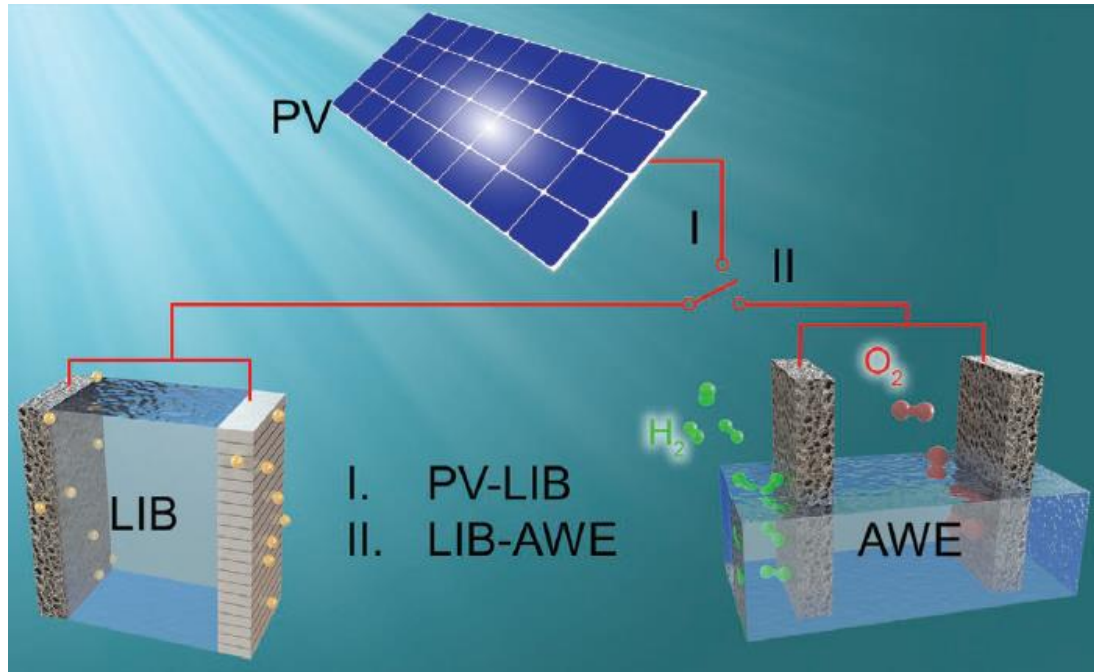


*Nota. Tomado de Hydrogen production by a low-cost electrolyzer developed through the combination of alkaline water electrolysis and solar energy use. / de Fátima Palhares et al.*

Para obtener datos más precisos, se utilizaron distintas configuraciones. Se probó el electrolito con hidróxido de potasio (KOH) e hidróxido de sodio (NaOH), resultando el KOH como el ganador debido a su mayor conductividad iónica. No obstante, en el estudio se destaca que el NaOH fue el electrolito escogido para las evaluaciones debido a su menor costo. Se probaron distintas concentraciones de NaOH, de 2 mol a 6 mol, obteniendo la mejor eficiencia entre 4 y 6 mol, ya que a concentraciones superiores de 6 mol se provoca una difusión iónica desfavorable. Al finalizar el estudio, se obtuvieron eficiencias del 1.5% en una conexión directa con el panel y del 2.3% con un sistema de "Seguimiento del Punto de Máxima Potencia" (MPPT), utilizado para maximizar la extracción de energía de los paneles solares. Esto se tradujo en la producción aproximada de 1 litro de hidrógeno durante un período de operación, con una pureza de hasta el 99.07%, siendo el resto un contaminante del aire atmosférico. (de Fátima Palhares et al., 2018).

Como se observa, una de las grandes problemáticas en la producción de hidrógeno mediante energías renovables, como la solar, es la intermitencia en el suministro de energía que esta proporciona a la celda. Afectando tanto la eficiencia de producción de hidrógeno como la durabilidad del electrolizador. Para superar esta limitación, se plantean dos soluciones pertinentes, las cuales se detallan a continuación:

Por lo anterior mencionado, autores como Sun et al, presentan una solución que implementa un sistema de carga y descarga utilizando baterías LIB. Este estudio propone un diseño de celda que utiliza un panel fotovoltaico para suministrar energía a una batería de iones de litio, la cual posteriormente se descarga para proporcionar la energía necesaria a la celda de electrólisis alcalina, como se muestra en la Figura 6.

**Figura 6***Esquema PV-LIB-AWE*

*Nota. Tomado de Solar-Driven Alkaline Water Electrolysis with Multifunctional Catalysts.*

*Advanced Functional Materials / Sun et al*

El estudio destaca el desarrollo de electrodos multifuncionales que pueden ser utilizados tanto en la batería de iones de litio para el almacenamiento de energía, como en la celda de electrólisis alcalina de agua para la producción de hidrógeno. Esto representa un desafío significativo debido a la complejidad y las múltiples propiedades que deben poseer los materiales de estos electrodos. Para el cátodo, se seleccionó óxido de níquel poroso decorado con carbono dopado con nitrógeno, y para el ánodo, óxido de cobalto de litio. La elección de estos materiales y su proceso de fabricación son cruciales para asegurar la calidad y reducir los costos.

El proceso de fabricación de estos electrodos comienza con la quelación de iones metálicos, en la que los iones  $\text{Ni}^{2+}$  se quelan con aminoácidos para evitar la agregación de nanopartículas. Posteriormente, se realiza pirólisis mezclando los iones metálicos con aminoácidos y sometiéndolos a altas temperaturas, lo que provoca la descomposición térmica de los precursores orgánicos e inorgánicos. Este proceso produce una estructura porosa tridimensional de carbono dopado con nitrógeno (NC), decorada con nanopartículas de óxido de níquel (NiO), mejorando así la superficie específica de contacto (sitios activos) y la conductividad electrolítica.

Para evaluar la eficacia de los electrodos, se sometieron a pruebas en ambos entornos (LIB y AWE) y se puso en funcionamiento todo el sistema. Después de 100 ciclos, los electrodos mostraron un desgaste mínimo, conservando más del 99% de su integridad. Además, se realizó una prueba continua durante 70 horas a niveles máximos de producción, y los electrodos se mantuvieron en óptimas condiciones. Se concluyó que el sistema de electrodos podría soportar cerca de 5000 ciclos, lo que equivale a aproximadamente de 13 a 14 años de uso, demostrando una gran viabilidad para su aplicación a escala industrial. Este sistema podría superar la barrera energética que plantea la energía solar, permitiendo su uso durante periodos de ausencia de luz, como en condiciones de nubosidad (Sun et al., 2020).

Por otro lado, en el artículo titulado " Mejora de la eficiencia y la consistencia de los electrolizadores alcalinos accionados por fuentes de energía renovables" (Xia et al., 2023), no se realiza pruebas específicas con energía solar. Sin embargo, el estudio sugiere que la energía solar sería óptima para este método, dado que su diseño aborda eficazmente las fluctuaciones en el suministro de energía.

El diseño consiste en una celda de electrólisis alcalina de agua convencional, cuyos canales están fabricados en acrílico PMMA, permitiendo la observación del proceso en su totalidad. El

electrolito utilizado es hidróxido de potasio (KOH) al 30% en peso. Las placas bipolares están hechas de acero inoxidable 304, compuesto por un 18% de cromo (Cr) y un 8% de níquel (Ni), lo que asegura una excelente resistencia a la corrosión y una alta durabilidad de la celda. El diseño incluye cinco celdas, en las cuales solo los electrodos inicial y final no son bipolares.

Durante las pruebas, se observó que, a baja corriente, cerca de 3V, las celdas no iniciaban el ciclo de descomposición del agua, mostrando una actividad electrolítica solo en las celdas 1 y 5. Para solucionar este problema, se implementó un Convertidor de Electrólisis de Auto-Optimización de Múltiples Modos (MMSOEC), que opera mediante pulsos. Este dispositivo se activa cuando detecta una corriente baja y minimiza el tiempo de apagado de la corriente del pulso, garantizando un suministro continuo de energía al electrocatalizador.

La fuente de alimentación, en términos simples, introduce al sistema numerosos armónicos de voltaje o corriente que no permiten la producción de hidrógeno y causan una pérdida abrupta de eficiencia. El MMSOEC asegura que estos armónicos no interrumpan el proceso, mejorando así la eficiencia y la consistencia de la producción de hidrógeno en condiciones de baja corriente.

### **3.4 Diseño de electrolizadores**

Cómo eje principal de esta revisión bibliográfica y que se presenta en la tabla 2 se tuvo en cuenta aquellos artículos que estudian la modificación de la estructura e implementos que conforman a las celdas de electrolisis para mejorar su eficiencia.

Tabla 2

*Comparativa diseño de celdas*

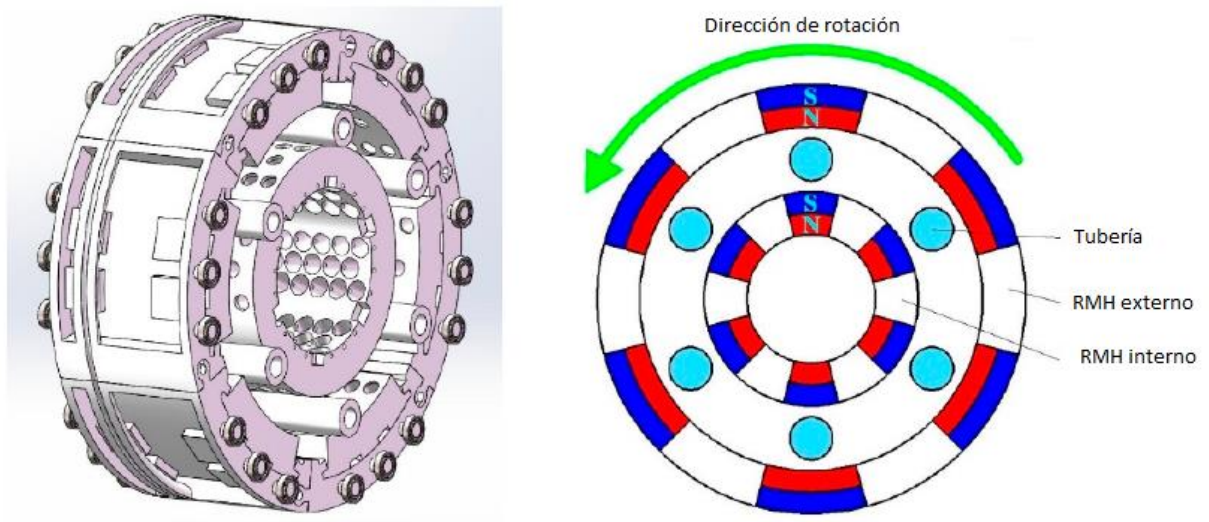
<i>Titulo</i>	<i>Resumen</i>	<i>Implementos</i>	<i>Contribución</i>
<b>Investigación sobre la producción de hidrógeno por electrólisis del agua utilizando un campo magnético giratorio.</b> (Guo et al., 2022)	<p>Se analiza el efecto de los campos magnéticos giratorios en la generación de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua, con el objetivo de proporcionar una referencia de investigación para la producción de hidrógeno y mejorar su eficiencia. El fenómeno experimental mostró que cuanto más rápida es la velocidad de rotación del campo magnético giratorio, más rápida es la velocidad de producción de gas hidrógeno.</p>	<p>El sistema consiste en dos celdas electrolíticas conectadas mediante varias tuberías. Los imanes en anillo rodean las tuberías y giran para crear un campo magnético rotatorio. Este campo induce el movimiento de cationes y aniones hacia los electrodos metálicos, facilitando la reacción de electrólisis del agua. El diseño incluye un soporte de imán rotatorio (RMH) que genera un potencial inducido para acelerar la producción de hidrógeno.</p>	<p>El análisis de la relación entre la fluctuación del voltaje y la densidad de corriente mostró que un aumento en la fluctuación del voltaje implica un aumento en la fluctuación de la densidad de corriente y la tasa de generación de burbujas de hidrógeno, incrementando así la velocidad de la reacción de electrólisis. Estos fenómenos indicaron que el uso de un campo magnético giratorio puede promover la reacción de electrólisis del agua más rápidamente, logrando un aumento en la velocidad de producción de hidrógeno.</p>
<b>Minimización de la resistencia óhmica de una celda de electrólisis alcalina mediante un diseño eficaz de la celda.</b> (Phillips et al., 2017)	<p>Investiga la reducción de la resistencia óhmica en celdas de electrólisis alcalinas mediante el diseño de celdas de "espacio cero". Se analizan parámetros operativos como la densidad de corriente y la temperatura, mostrando que el diseño de espacio cero supera al estándar en todas las densidades de corriente. También se evalúa el impacto de la morfología de los electrodos porosos.</p>	<p>Los electrodos están montados en una estructura rígida y sellada que los mantiene alineados y en contacto cercano, todos los electrodos se encuentran a la misma distancia y entre ellos tienen un separador poroso. El material y morfología de los electrodos es espuma de níquel.</p>	<p>Se concluye que la optimización del diseño de la celda y la morfología de los electrodos es crucial para minimizar la resistencia óhmica y mejorar la eficiencia global del proceso de electrólisis alcalina. Se demostró una reducción del 30% en la resistencia óhmica en comparación con el diseño convencional de espacio finito.</p>
<b>Diseño de un electrolizador de agua alcalina para la producción de hidrógeno</b>	<p>Se centra en la implementación de una configuración de celda de "cero-gap" y la selección de materiales adecuados para los electrodos y otros componentes. Se llevaron a cabo simulaciones térmicas y</p>	<p>La configuración de la celda es unipolar y de "cero-gap". Conformada por membrana separadora para evitar la mezcla de gases, solución de KOH como electrólito, software</p>	<p>El diseño mejora la eficiencia de producción de hidrógeno mediante la reducción de pérdidas óhmicas y la operación a densidades de corriente más altas. La selección de materiales como el níquel y el</p>

(Igwe et al., 2023)	de estrés para asegurar la idoneidad de los materiales seleccionados, confirmando que los diseños propuestos son eficientes y seguros para la producción de hidrógeno en condiciones operativas extremas.	Autodesk Inventor Nastran 2019 para simulaciones térmicas y de estrés. Los materiales de los electrodos son níquel (ánodo) y acero o níquel activado (cátodo).	uso de una configuración de "cero-gap" aseguran una alta actividad electrocatalítica y resistencia a la corrosión, contribuyendo a la eficiencia y seguridad del sistema. Las simulaciones confirman que los materiales y diseños propuestos son adecuados para las condiciones operativas del electrolizador
<b>Diseño de un electrolizador de agua de "zero-gap" a escala de laboratorio</b>	Abarca los antecedentes del proyecto, el diseño conceptual y de fabricación, y los experimentos realizados para probar la celda. Con el objetivo de crear una celda que funcione de forma eficaz y segura para el proceso de electrólisis en medio alcalino.	La celda de electrólisis incluye una estructura de soporte, un termopar tipo K para monitorear la temperatura, y un datalogger PicoLog TC-08 para registrar los datos. Los electrodos utilizados son de níquel.	Desarrollo de una célula de electrólisis funcional diseñada específicamente para la electrólisis del agua alcalina. El diseño incorpora diversas medidas de seguridad y una instrumentación precisa para garantizar una recogida de datos exacta. El informe también incluye el código Matlab para calcular las concentraciones de electrolito y dibujos técnicos para la reproducibilidad.
(Timmers, 2022)			
<b>Avances recientes en la electrólisis del agua con membranas de intercambio alcalino y la fabricación de electrodos</b>	Revisa los avances recientes en la electrólisis de agua utilizando membranas de intercambio aniónico (AEMWE) y la fabricación de electrodos. Se analizan componentes clave como los electrodos, membranas y placas bipolares, y se destacan métodos de fabricación de electrodos, así como contribuciones recientes en investigación.	En el ánodo, se utilizan innovadoras mezclas de óxidos de cobalto y cobre ( $Cu_xCo_yO_z$ ) preparados mediante sputtering. En el cátodo, se emplean metales no nobles como el níquel. Las membranas de intercambio aniónico (AEM), como Fumasep y Sustainion, garantizan un rendimiento óptimo. El electrolito es una solución de KOH (hidróxido de potasio) de 1.0 M	La principal contribución del estudio es la combinación de un electrolizador de agua alcalina que implica bajos costos y una membrana de intercambio que aporta una alta eficiencia y rendimiento. Se destaca la viabilidad de utilizar magnetron sputtering para la producción a gran escala de electrodos, los cuales muestran una alta actividad específica y estabilidad.
(López-Fernández et al., 2021)			

<b>Avances recientes en la separación mejorada de burbujas en electrolizadores de agua alcalina</b>	Revisión detallada de las técnicas de intensificación y optimización en electrolizadores de agua alcalina (AWE) para la producción de hidrógeno. Se enfocan en la optimización de los componentes clave, como los electrodos y los canales de flujo de las placas bipolares, para mejorar el rendimiento y la eficiencia de los electrolizadores. Además, se discuten los métodos para mejorar la separación de burbujas y se analizan las ventajas y desventajas de varias técnicas utilizadas en electrolizadores industriales.	Canales de flujo optimizados en las placas bipolares para mejorar la distribución del caudal y la separación de burbujas. Además, se considera el uso de campos magnéticos y ultrasonido para mejorar la separación de burbujas y la eficiencia del electrolizador. Se utilizan electrodos de espuma de níquel (NF) con estructuras porosas para aumentar el área de superficie y reducir la sobretensión	Estas mejoras tienen el potencial de aumentar la eficiencia y reducir los costos de los electrolizadores a gran escala. El uso de electrodos de espuma de níquel con estructuras porosas y la incorporación de técnicas como campos magnéticos y ultrasonido representan enfoques innovadores para abordar los desafíos asociados con la separación de burbujas y la distribución del caudal en electrolizadores industriales.
---	---	---	--

Dentro del diseño óptimo de una AWE, es crucial considerar la conductividad del electrolito. En este sentido, Guo et al en su artículo describe una celda electrolítica rectangular con extremos superior e inferior trapezoidales, fabricada en plexiglás. Los electrodos consisten en láminas de cobre fijadas por varillas metálicas en el centro de la celda. El sistema de recolección del hidrógeno producido utiliza bolsas de poliéster y aluminio. El sistema esta interconectado mediante tubos rodeados por un soporte magnético giratorio (RMH, por sus siglas en inglés), el RMH es un campo magnético giratorio capaz de cambiar de dirección de manera constante respecto a un eje.

El RMH incluye 240 imanes de neodimio, con un diámetro de 10 mm y una longitud de 15 mm, divididos en una base interna y otra externa. Estos imanes generan un campo magnético de aproximadamente 4510 Gauss en el sistema, como se puede apreciar en la figura 7. Todo el sistema es impulsado por una correa de transmisión conectada a un motor externo.

**Figura 7***Estructura RMH*

*Nota. Research on Hydrogen Production by Water Electrolysis Using a Rotating Magnetic Field*  
/ Guo et al

En términos generales, cuando el RMH gira, induce un campo magnético en el sistema que obliga a los iones a migrar. Los cationes son impulsados hacia el cátodo, lo que obliga a las moléculas de agua a absorber electrones del cátodo y a disociarse en  $H_2$  y  $OH^-$ . El  $OH^-$  es transportado al ánodo debido al campo magnético, donde se produce  $O_2$ . Se observa que a mayor velocidad de giro del RMH, mayor es la velocidad de reacción de descomposición del agua, dado que una mayor velocidad aumenta la difusión y concentración de los iones presentes en el electrolito.

Por otro lado, autores como Igwe et al y Timmers, plantean un diseño de celda más atractivo para el ámbito industrial por sus eficiencias, sus costos relativamente menores a otras

nuevas tecnologías emergentes y su adaptabilidad a ambientes extremos (altas energías, altas concentraciones del electrolito, etc.). Esta celda es conocida como "Zero gap" o "de espaciado cero", en la cual el parámetro de la distancia de electrodos, que generalmente en muchos estudios y autores coincidían en 2 mm, es modificado por el espesor de la membrana de separación. Así, Igwe et al realiza un estudio en el que comparan las resistencias óhmicas en una celda AWE y una Zero gap, que no es más que la resistencia que encuentra la energía para fluir libremente (esto se traduce en grandes pérdidas de eficiencia de la celda).

En este estudio se utilizan distintas estructuras de electrodos, como el de espuma, que tiene un 2% de reducción en la resistencia óhmica respecto al de malla. El sistema de la celda es cuadrado, con espaciadores en acrílico con silicona. Se demuestra que, al reducir la separación de los electrodos, se obtiene un 30% de reducción de la resistencia óhmica de la celda en total. De igual forma, variables como la temperatura (30 °C a 80 °C) influyen favorablemente en la cinética de los electrodos. También se observa que, a mayor caudal del electrolito, se optimiza la eliminación de burbujas; sin embargo, se debe tener cuidado, ya que, si se acelera mucho el caudal, no se permitirá el correcto crecimiento de las burbujas y se desprenderán prematuramente, disminuyendo la capacidad de formación de gases.

Para analizar más a fondo las celdas de electrólisis de Zero gap es esencial considerar los materiales comúnmente utilizados y las razones detrás de su elección. Este análisis permite comprender mejor las propiedades y el desempeño de los componentes de la celda, según se detalla la Tabla 3, se presenta un resumen detallado de los materiales empleados en la construcción de las celdas Zero gap, destacando sus propiedades específicas y las razones técnicas de su selección.

**Tabla 3***Propiedades materiales celda Zero-Gap*

<b>Componente</b>	<b>Material seleccionado</b>	<b>Razones</b>
<b>1</b> Pacas terminales	Teflón (PTFE) y plástico polipropileno	1) Resistentes, dúctiles, resistentes a golpes y vibraciones, y poseen una elevada resistencia a la tracción y a la compresión. resistencia a la tracción y a la compresión. 2) Resistente a la oxidación y la corrosión.
<b>2</b> Electroodos	Níquel	1) Buen conductor eléctrico. 2) Resistente a la corrosión. 3) Estable en medios alcalinos.
<b>3</b> Juntas de estanqueidad	Caucho de silicona	1) Buen aislante eléctrico. 2) Resistente a vibraciones y golpes. 3) Estabilidad química a largo plazo y excelente capacidad de sellado.
<b>4</b> Diafragma	Zirfon (Agfa Zirfon Perl UTP 500), y tejido geotextil del PP tejido geotextil.	1) Alta conductividad iónica. 2) Resistente al oxígeno atómico producido en el electrodo anódico.
<b>5</b> Espaciadores	teflón y plástico PP	1) Buena resistencia al impacto y a la corrosión química. 2) Disponibilidad y bajo coste.
<b>6</b> Tornillos y tuercas	Acero inoxidable	Alta resistencia a la torsión y a la fatiga.
<b>7</b> Tubo electrolítico	Caucho de silicona	1) Resistente al envejecimiento, la temperatura y la corrosión química. 2) Flexible, fuerte y resistente.
<b>8</b> Depósito de electrolito	Plástico polipropileno	1) Muy denso. 2) Fácilmente disponible y barato. 3) Duro, duradero y con excelente resistencia a la tracción.
<b>9</b> Electrolito	Solución KOH	Alta conductividad iónica.
<b>10</b> Fuente de alimentación	Fuente de alimentación de 12 V CC para banco CC7 12 V Fuente de alimentación de CC para bancos de 12 V, 5 A.	Fuente de alimentación de banco de 12 V, 5 A CC

*Nota. Tomado de ). Design of an Alkaline Water Electrolyzer for Hydrogen Production. American*

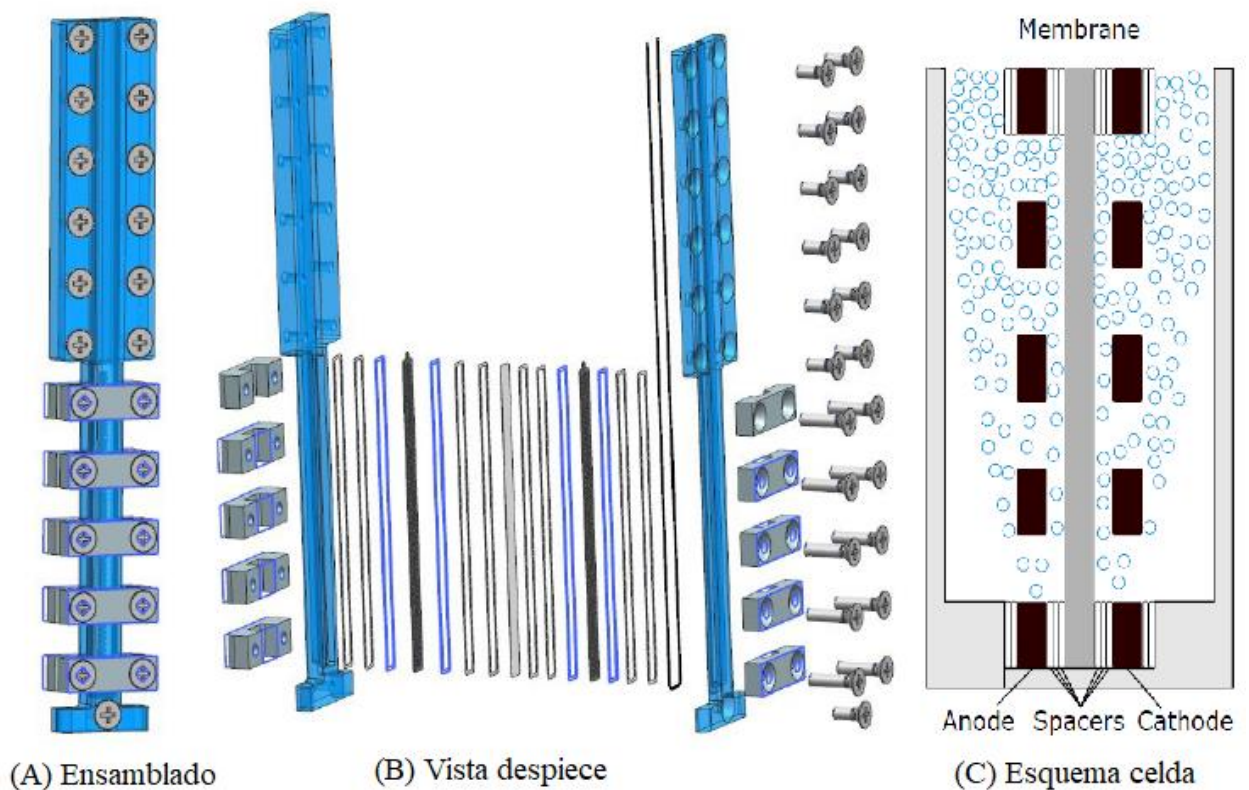
*Journal of Mechanical and Industrial Engineering | Igwe et al.*

La tabla proporciona una visión integral de los componentes fundamentales de la celda Zero gap, incluyendo electrodos, membranas, electrolitos espaciadores, etc. Cada material es elegido por sus propiedades únicas que optimizan el rendimiento de la celda.

El diseño general se puede apreciar más a profundidad en el "Diseño de un electrolizador de agua de "zero-gap" a escala de laboratorio" (Timmers, 2022). En este se utiliza un electrolito de KOH al 30% en peso, una carcasa fabricada en PCTFE, dos electrodos unipolares para facilitar el diseño y una membrana de Zirfon 220 (elegida por su fácil y rápida distribución), y finalmente unas capas espaciadoras. Este diseño de celda se puede ver más claramente en la figura 8.

### Figura 8

#### Esquema Zero-Gap



Nota. Tomado de Design of a lab-scale "zero-gap" water electrolyser. / Timmer

Durante el proceso de pruebas, se realizan distintas evaluaciones para garantizar que los componentes estén en óptimas condiciones. Se conecta inicialmente los electrodos sin un electrolito y posteriormente se introduce el electrolito al sistema, comprobando así que la energía solo circula cuando el electrolito está en contacto con los electrodos. También, para comprobar el sello hermético de la celda, se realiza una prueba de fugas con el electrolito.

Es importante destacar que, aunque el diseño resulta muy atractivo para la producción de hidrógeno, especialmente en el ámbito industrial por su resistencia a altas condiciones de funcionamiento, en la práctica surgen diversas limitaciones y desafíos como los encontrados en esta investigación, que deben ser abordados de la mejor forma.

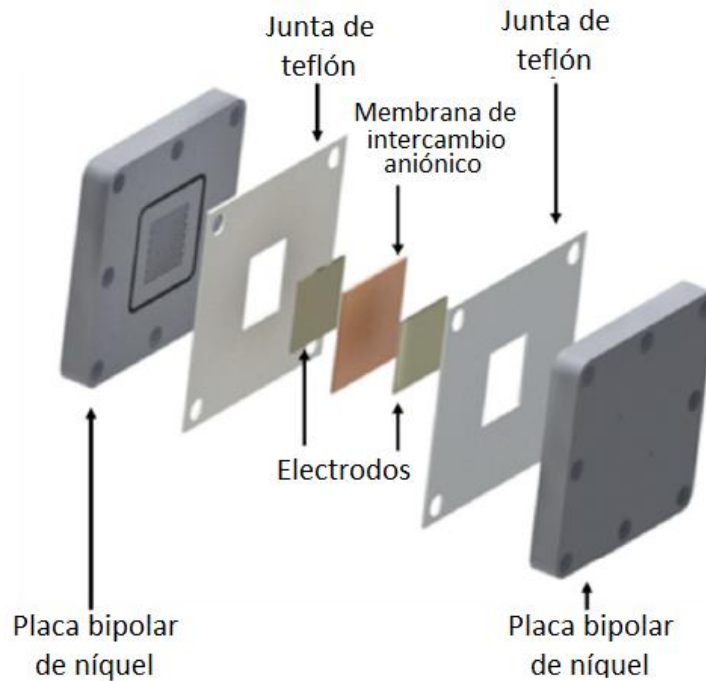
La primera dificultad encontrada es que a altas corrientes la temperatura del electrolito puede aumentar de forma descontrolada, trayendo problemas como la variación de las propiedades químicas de la celda, la degradación prematura de los materiales y la producción de reacciones secundarias indeseadas en este proceso. Esto se puede prevenir manteniendo una densidad de corriente adecuada según la concentración del electrolito.

Como segunda dificultad se encuentran las soldaduras de los electrodos. Comúnmente, los electrodos son soldados con distintas composiciones de estaño, pero las altas concentraciones del electrolito KOH pueden disolverlas. Una posible solución es el reemplazo de la soldadura por diminutos pernos para asegurarlos de forma eficaz; sin embargo, esto genera ciertas controversias ya que se debe asegurar que los pernos no tengan actividad en el electrolito y no afecten de ninguna forma la cinética de las reacciones presentes.

La tercera dificultad, el tamaño de la celda Zero gap es pequeño con relación a los cables de conexión utilizados, lo que llega a bloquear la formación de burbujas o el desprendimiento de

estas. Esto se puede solucionar fácilmente aumentando el tamaño de la celda o mejorando la distribución de estos cables.

Para finalizar esta sección se traen a colación nuevas tecnologías implementadas, como lo son las celdas de electrólisis de agua con membrana de intercambio de protones (PEM), las cuales ofrecen unas ventajas interesantes, como altas densidades de corriente, respuesta rápida bajo suministro de energía eléctrica intermitente y un diseño de celda compacto. Resuelven problemas de cruce de gases a través del diafragma en celdas de AWE, y el verdadero problema surge en los costos (generalmente en el diseño de los electrodos). Aunque este tipo de celdas no son el enfoque de este estudio, sí se hace relevante la presentación del artículo de López-Fernández et al., en el que se muestra la unión de dos sistemas para electrolisis de agua como lo son la AWE y PEM, obteniendo así las ventajas de cada una. Es así como surge un nuevo diseño de celda denominado electrólisis de agua con membrana de intercambio aniónico (AEMWE). En estas celdas, el diseño general consta de 2 placas de campo de flujo fabricadas en titanio, dos juntas de teflón y el conjunto de electrodos con la membrana. Esto se puede apreciar más fácilmente en la figura 9.

**Figura 9***Esquema AEMWE*

*Nota. Tomado de Recent Advances in Alkaline Exchange Membrane Water Electrolysis and Electrode Manufacturing / López-Fernández et al*

Los electrodos de esta celda son los mismos de una AWE, que resultan económicos; pueden ser de una fase de catalizador activo depositado sobre un soporte poroso. A las placas se les debe grabar un circuito en el que se distribuirá de manera eficiente el flujo de electrolito a través de los electrodos. El electrolito usado debe ser un alcalino débil; este puede ser bajas concentraciones de KOH o incluso se puede utilizar agua destilada, facilitando el funcionamiento de la celda y abaratando costos. El diafragma son unas membranas poliméricas con sales de amonio, las cuales facilitan el intercambio aniónico.

### 3.5 Electrocatalizadores alternativos

Aunque no es el motivo de estudio principal que se desea abordar en este documento, como ya se mencionó y se evidencia en los artículos anteriores y los presentados en la tabla 4, los electrodos son parte fundamental para garantizar la eficiencia de la celda electrolítica, es por eso por lo que se hace un énfasis en los materiales con los cuales están diseñados estos electrodos. Los cuales se encargan de potenciar las reacciones involucradas en el proceso. Es por esto por lo que cobra vital importancia la selección meticulosa de los materiales para la fabricación de estos electrocatalizadores, ya que su composición y propiedades determinan en gran medida su capacidad de catálisis en la descomposición del agua.

**Tabla 4**

*Comparativa de electrocatalizadores*

<i>Titulo</i>	<i>Resumen</i>	<i>Composición electrodos</i>	<i>Contribución</i>
<b>Diseño racional de electrocatalizadores de la reacción de evolución del hidrógeno para la electrólisis comercial del agua alcalina</b>  (Xu et al., 2023)	El artículo analiza el diseño y desarrollo de electrocatalizadores eficientes para la reacción de evolución de hidrógeno (HER) en el contexto de la electrólisis comercial de agua alcalina, comparando diferentes materiales y estructuras de electrodos. Además, proporciona estrategias para el diseño racional de electrocatalizadores que puedan operar eficientemente a altas densidades de corriente en condiciones industriales.	Distintas aleaciones de níquel, (níquel-molibdeno, níquel-cobalto, Raney níquel) y nanomateriales metálicos.	Desarrollo de electrodos con aleaciones de níquel y con un diseño tridimensional, permiten mejorar la actividad y estabilidad de los electrocatalizadores sin el uso de metales nobles, lo que puede reducir significativamente los costos de producción de hidrógeno. Además, permite electrodos Área > 100 cm <sup>2</sup> y celdas con montaje bipolar que puedan operar a altas densidades de corriente en condiciones industriales.

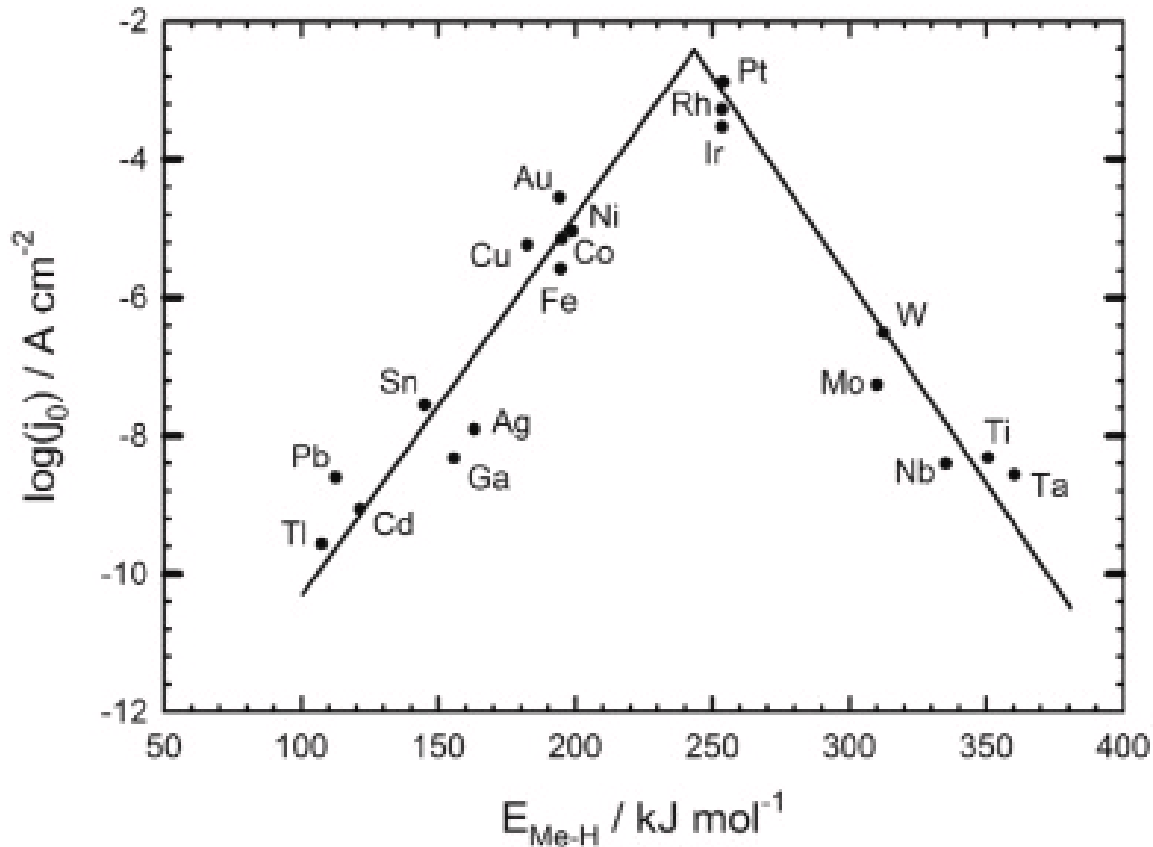
<b>Desarrollo reciente de nanoestructuras de aleaciones metálicas para la generación electroquímica de hidrógeno.</b>	Revisión de métodos de síntesis y evaluación para aleaciones nanoestructuradas como catalizadores utilizados en generación electroquímica de hidrógeno. Destaca la importancia de optimizar composición y estructura de las aleaciones para mejorar su actividad catalítica y durabilidad.	NiFeCo Ni-Mo Au-Pd Pt/Ni	Síntesis y optimización de métodos, evaluación del rendimiento de aleaciones, innovaciones en materiales, y propuestas para investigaciones futuras enfocadas en mejorar la durabilidad y reducir costos.
(Han et al., 2019)			

Los electrocatalizadores alternativos emergen como una solución prometedora para superar las limitaciones de los catalizadores tradicionales, principalmente aquellos basados en metales preciosos, como el platino, que, aunque efectivos, presentan costos prohibitivos y problemas de disponibilidad.

Como herramienta importante en la selección de materiales surge el diagrama de “Volcano” presentado en figura 10. Donde se observa como los metales son situados en un eje en función de su energía libre de formación de hidruros, mientras que en el otro eje se representa la actividad catalítica. Los metales ubicados en la parte superior del diagrama poseen una alta tendencia a formar hidruros, lo que se traduce en una fuerte afinidad por el hidrogeno, mientras que los metales ubicados en la parte inferior poseen una baja afinidad con el hidrogeno, es decir tienden a ser menos efectivos en el rol de catalizadores en la reacción de electrólisis.

**Figura 10**

Diagrama de volcán para la reacción de evolución de hidrogeno.



Nota. Tomado de *Electrocatalysts for the hydrogen evolution reaction in alkaline and neutral media. A comparative review* | Āurovič et al.

Idealmente se puede concluir que los materiales para la fabricación de los electrodos deberían encontrarse en una posición intermedia del diagrama, indicando una adecuada afinidad por el hidrogeno y alta actividad catalítica. También se obtienen distintos tipos de metales que se pueden combinar en aleaciones para obtener una optimización de las propiedades que benefician las reacciones. Como un ejemplo de esto encontramos que la aleación Ni-Mo ha mostrado una

capacidad superaerofóbica, mientras que la Ni-Fe-Co presenta menor resistencia a la transferencia de carga en comparación con el níquel puro, lo que mejora la electroactividad.

El diseño y la optimización de electrocatalizadores alternativos se centran también en la modificación de la estructura electrónica y morfológica de los materiales para maximizar su actividad catalítica. Por ejemplo, la dopación de materiales con elementos como el hierro en fosfuro de níquel ha mostrado una disminución significativa en el sobrepotencial necesario para la reacción de evolución de hidrógeno (HER), alcanzando un sobrepotencial de 100 mV en una solución de KOH 1M. Además, la creación de defectos en la estructura del material y la ingeniería de heteroestructuras, como el  $\text{MoS}_2/\text{Ni}_3\text{S}_2$ , contribuyen a mejorar la actividad catalítica y la estabilidad de los electrocatalizadores.

A continuación, se explica algunos electrodos mencionados en el artículo de diseño racional de electrodos (Xu et al., 2023), los cuales son utilizados en la electrólisis del agua incluyen una variedad de materiales y configuraciones, cada uno con procesos de fabricación específicos y propiedades únicas:

-Electrodos de NiMoOx/NiMoS: Combinan óxidos y sulfuros de níquel y molibdeno, optimizando la actividad catalítica y la durabilidad. La síntesis de estos materiales involucra métodos de deposición química en fase vapor y tratamiento térmico para formar estructuras nanoporosas que facilitan la difusión de reactivos y productos.

-Electrodos de CoMoSx: Utilizados por su alta actividad en medios alcalinos, estos electrodos se sintetizan a través de la deposición de películas delgadas y la creación de capas de sulfuro de cobalto y molibdeno. Presentan estabilidad operativa a corrientes elevadas por periodos prolongados.

-Electrodos de Pt SAs/MoO<sub>2</sub> NRs: Aunque el platino sigue siendo un material de referencia por su alta eficiencia, la dispersión de átomos individuales de platino en nanodos de MoO<sub>2</sub> ha permitido reducir la cantidad de metal precioso utilizado, manteniendo una alta actividad catalítica.

A partir de esto, se observa que los materiales basados en aleaciones y compuestos de níquel y molibdeno (como NiMoO<sub>x</sub>/NiMoS) suelen ofrecer un buen balance entre costo, actividad y estabilidad. Por otro lado, los electrocatalizadores de CoMoS<sub>x</sub>, aunque ligeramente menos activos en comparación con los de níquel-molibdeno, presentan una excelente durabilidad, lo cual es crucial para aplicaciones industriales a gran escala, esenciales para avanzar hacia una economía de hidrógeno viable y escalable (Han et al., 2019).

### 3.6 Matriz de comparación

Después de la clasificación anterior se logró explicar todo el panorama de condiciones e implementos que componen una celda y que deben tenerse en cuenta en la etapa de diseño para obtener un sistema eficaz. Es así como para entender el alcance que tuvo cada estudio, se procede a hacer una comparación de la información para tener una noción de la viabilidad de estas tecnologías, a través de un criterio ingenieril se consideraron factores que son importantes al momento de llevar estos resultados a pruebas piloto para su posterior implementación a escala industrial.

Factores considerados en la matriz,

- **Costos:** Se deben considerar los materiales utilizados, la complejidad de la fabricación
- **Seguridad:** consideración crítica en cualquier sistema que maneje productos químicos y electricidad. La evaluación de la seguridad implica garantizar que la celda esté diseñada para minimizar riesgos de fugas, explosiones o reacciones no deseadas.

- **Eficiencia eléctrica:** eficiencia con la que la energía eléctrica se convierte en energía química en forma de hidrógeno. Una mayor eficiencia eléctrica significa una producción de hidrógeno más económica y menos demanda de energía.
- **Eficiencia de conversión:** Esta medida indica qué fracción del agua se convierte en hidrógeno y qué fracción se pierde como subproductos no deseados. Una alta eficiencia de conversión es fundamental para maximizar la producción de hidrógeno.
- **Durabilidad:** tener una larga vida útil para ser económicamente viable. La evaluación de la durabilidad implica estudiar cómo la celda resiste la corrosión y otros efectos adversos durante su funcionamiento a largo plazo.
- **Compatibilidad con fuentes de energía renovable:** Dado el interés en la producción de hidrógeno a partir de fuentes de energía renovable, como la solar o la eólica, la celda de electrólisis debe ser compatible con estas fuentes y ser capaz de aprovechar su energía de manera eficiente.
- **Escalabilidad:** Los procesos deben garantizar una futura escalabilidad Industrial
- **Fiabilidad y mantenimiento:** A medida que la producción aumenta, la fiabilidad y el mantenimiento eficiente se vuelven aún más críticos. La celda debe diseñarse para minimizar el tiempo de inactividad y los costos de mantenimiento, lo que contribuirá a su viabilidad a largo plazo.
- **Disponibilidad y costos de materias primas:** La escalabilidad industrial también depende de la disponibilidad y los costos de los materiales y componentes utilizados en la celda. Debe ser posible adquirir cantidades suficientes de materiales a precios razonables para la producción a gran escala.

- **Flexibilidad operativa:** La capacidad de la celda para adaptarse a diferentes condiciones operativas, como variaciones en la carga eléctrica o la calidad del agua de alimentación, puede ser importante dependiendo de la aplicación específica.

**Tabla 5***Matriz comparativa de conceptos*

No	Criterios de selección	Peso	A) PV-LIB-AWE		B) Zero-Gap		C) AEMWE	
			Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
1	Costos Fabricación	14%	3	0,42	4	0,56	3	0,42
2	Seguridad	12%	3	0,36	3	0,36	4	0,48
3	Eficiencia eléctrica	14%	4	0,56	4	0,56	5	0,7
4	Eficiencia de conversión	9%	3	0,27	4	0,36	5	0,45
5	Durabilidad	13%	4	0,52	3	0,39	3	0,39
6	Compatibilidad con fuentes de energía renovable	10%	5	0,5	2	0,2	4	0,4
7	Escalabilidad	7%	5	0,35	3	0,21	4	0,28
8	Fiabilidad y mantenimiento	7%	3	0,21	3	0,21	4	0,28
9	Disponibilidad y costos de materias primas	9%	3	0,27	4	0,36	3	0,27
10	Flexibilidad operativa	5%	3	0,15	4	0,2	4	0,2
<b>Total puntos</b>			36	3,61	34	3,41	39	3,87

En la tabla 5, se realiza la evaluación de tres diseños de celda presentados en los diferentes documentos estudiados. La elección de los diseños para esta comparación se tuvo en cuenta de acuerdo con aquellos en los cuales se integran y evalúan sistemas innovadores a favor de optimizar la electrólisis alcalina del agua. A partir de esto, se puede ver que el primer diseño (PV-LIB-AWE) destaca por su fuerte compatibilidad con fuentes de energía renovables y su gran escalabilidad, obteniendo así una puntuación de 3,61. Por otro lado, el diseño Zero-Gap sobresale en ámbitos como sus costos de fabricación y la disponibilidad de materias primas, dando como resultado una puntuación de 3,41. Sin embargo, estas características no son suficientes para superar el rendimiento global de la celda (AEMWE), que resalta en aspectos como eficiencia eléctrica y eficiencia de conversión, con una puntuación final de 3,87, gracias a que combina los mejores aspectos de los dos tipos de celda más recientes.

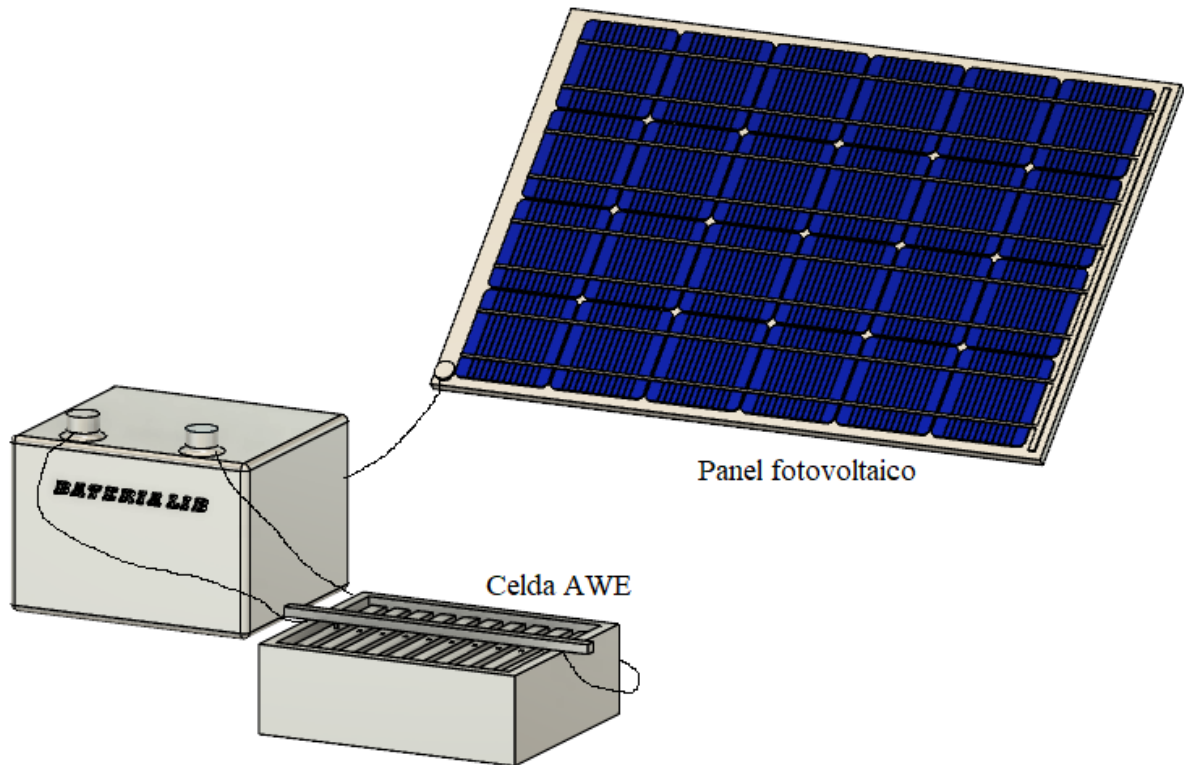
### **3.7 Análisis de factibilidad**

Al reunir características que son consideradas factibles en la electrólisis alcalina del agua para la producción de hidrógeno, se presenta el desglose de un diseño de celda planteado por el autor para posteriores estudios y poder escalar el diseño de celdas AWE de plantas piloto a una escala industrial. En la figura 11 se presenta el esquema de AWE a nivel general propuesto. Este consiste en un panel fotovoltaico, aprovechando las energías renovables en este proceso que busca ser amigable con el medio ambiente. Además, se encuentra conectado a un sistema de baterías LIB, el cual resulta interesante por la implementación de nuevas tecnologías de electrocatalizadores multifuncionales para mejorar los problemas de intermitencia y pérdidas de eficiencia muy comunes por el sistema de paneles solares. Por último, todo este sistema se

encuentra controlado por un sistema MMSOEC encargado de regular finalmente la corriente de alimentación de la celda AWE.

### Figura 11

*Esquema estructural de un sistema de electrolisis alcalina del agua*



Como se puede apreciar en la figura 11, la estructura general para la producción de hidrógeno es sencilla, buscando siempre la mayor eficiencia posible. Es así como se eligen los parámetros para cada una de las partes.

El panel fotovoltaico se recomienda no estar conectado a una distancia mayor a los 25 m de las baterías LIB, ya que esto podría ocasionar una pérdida de energía. A mayor distancia, la energía podría ser liberada en forma de calor, disminuyendo la eficiencia.

Para la batería LIB, se recomienda el uso de electrodos multifuncionales de óxido de níquel poroso decorado con carbono dopado con nitrógeno. Esto se debe a que ha demostrado en los artículos evaluados su alta eficiencia en la carga y descarga de energía, así como su alta durabilidad.

El sistema MMSOEC se implementa como un control adicional para tener controlada la entrega de corriente hacia la celda, evitando al máximo los armónicos que disminuyen la eficiencia del proceso y causan un desgaste prematuro de los electrodos de la celda.

Para finalizar con el diseño se plantean electrodos bipolares alternativos de una aleación de Níquel, pues en análisis anteriores se observa que presentan una excelente conductividad eléctrica, resistencia a la corrosión, durabilidad y su costo se respaldado en la efectividad que trae al sistema. De igual forma a estos electrodos hacerles unas estructuras jerárquicas (Nanoestructuras, dendríticas, espumas metálicas, etc.) para aumentar la superficie activa y mejorar la gestión de gases.

#### 4. Conclusiones

El análisis realizado en esta investigación permitió identificar a grandes rasgos el estado actual y la motivación para implementar el hidrógeno como una estrategia clave para la descarbonización. Este interés ha dirigido la atención hacia el proceso de electrólisis alcalina del agua como un método prometedor para la producción de hidrógeno verde. Adicionalmente, se consideraron los factores termodinámicos y cinéticos que influyen en los diseños de estos sistemas, lo cual es crucial para optimizar la producción. La comprensión detallada de estos aspectos logró identificar y categorizar distintos diseños de celdas alcalinas de agua para la producción de hidrógeno, resaltando la gran importancia de implementar energías renovables, como la solar, para la alimentación de las celdas, las innovaciones más recientes en tecnologías de diseños de celdas AWE y de igual manera el futuro estudio de electrocatalizadores alternativos.

La matriz comparativa de conceptos permitió una evaluación más precisa y con criterio ingenieril de las ventajas y desventajas de los diferentes diseños de celdas de electrólisis. Este análisis reveló la importancia de utilizar electrodos de aleación de níquel con estructuras jerárquicas, que ofrecen una excelente combinación de eficiencia y costos. Asimismo, se destacaron las celdas de electrólisis de membrana alcalina (AEMWE) como particularmente prometedoras para la producción a gran escala de hidrógeno. Aunque estas tecnologías son relativamente nuevas, es esencial llevar a cabo estudios adicionales para medir su verdadero potencial. Estas investigaciones son cruciales para validar su viabilidad y mejorar su rendimiento en aplicaciones industriales, garantizando así que la transición hacia el hidrógeno verde sea tanto económicamente viable como tecnológicamente avanzada.

El análisis de factibilidad realizado en esta investigación propuso un diseño innovador del sistema de electrólisis alcalina del agua, que incluye la implementación de un panel fotovoltaico para suministrar energía renovable. Además, se incorporó una batería LIB con electrodos multifuncionales y una celda AWE con electrodos de aleaciones de níquel y estructuras como espuma de níquel. Este enfoque integral no solo mejora la eficiencia energética del sistema, sino que también establece una base sólida para futuras investigaciones orientadas a optimizar cada componente del sistema. La combinación de estos elementos promete avanzar significativamente en la producción sostenible de hidrógeno verde, destacando el potencial de las tecnologías emergentes en la descarbonización efectiva.

## **5. Recomendaciones**

Se recomienda llevar a cabo evaluaciones y pruebas experimentales para poder hacer un escalado del diseño desde niveles de laboratorio a procesos industriales. De igual forma, es fundamental realizar estudios exhaustivos que permitan determinar las dimensiones y características óptimas de las celdas de electrólisis, asegurando así la mayor eficiencia y durabilidad posibles.

### Referencias Bibliográficas

Allen J. Bard, Larry R. Faulkner, H. S. W. (2022). Electrochemical Methods - Book 3th Edition.

Jurnal Penelitian Pendidikan Guru Sekolah Dasar, 6(May), 1104.

<https://www.wiley.com/en->

[ae/Electrochemical+Methods%3A+Fundamentals+and+Applications%2C+3rd+Edition-](https://www.wiley.com/en-ae/Electrochemical+Methods%3A+Fundamentals+and+Applications%2C+3rd+Edition-)

[p-9781119334057](https://www.wiley.com/en-p-9781119334057)

Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions, Ed. by M. Pourbaix, NACE International, Houston TX.

Banco mundial. (2023). Un nuevo informe revela retrasos en el acceso a energías básicas y la necesidad de invertir en renovables. 6 de junio.

<https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2023/06/06/basic-energy-access-lags-amid-renewable-opportunities-new-report-shows>

¿Cómo afectan los combustibles fósiles a la salud humana? - Greenpeace México. (n.d.). Retrieved June 17, 2024, from <https://www.greenpeace.org/mexico/blog/9853/como-afectan-los-combustibles-fosiles-a-la-salud-humana/>

de Fátima Palhares, D. D. A., Vieira, L. G. M., & Damasceno, J. J. R. (2018). Hydrogen production by a low-cost electrolyzer developed through the combination of alkaline water electrolysis

and solar energy use. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(9), 4265–4275.  
<https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2018.01.051>

Đurovič, M., Hnát, J., & Bouzek, K. (2021). Electrocatalysts for the hydrogen evolution reaction in alkaline and neutral media. A comparative review. *Journal of Power Sources*, 493, 229708. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2021.229708>

E. Zoulias, & Elli Varkaraki. (n.d.). A Review on Water Electrolysis. Retrieved June 18, 2024, from  
[https://www.researchgate.net/publication/284618929\\_A\\_Review\\_on\\_Water\\_Electrolysis](https://www.researchgate.net/publication/284618929_A_Review_on_Water_Electrolysis)

Guo, H., Kim, H. J., & Kim, S. Y. (2022). Research on Hydrogen Production by Water Electrolysis Using a Rotating Magnetic Field. *Energies* 2023, Vol. 16, Page 86, 16(1), 86.  
<https://doi.org/10.3390/EN16010086>

Han, Q., Fan, L., & Wan, H. (2019). Recent Development of Metal Alloy Nanostructures for Electrochemical Hydrogen Generation. *International Journal of Electrochemical Science*, 14(12), 10549–10559. <https://doi.org/10.20964/2019.12.21>

Hidrógeno Verde Servicios de Ingeniería y Consultoría | IDEAGREEN. (n.d.). Retrieved October 4, 2023, from <https://ideagreen.es/hidrogeno-verde/>

IEA. (2022). La década del hidrógeno.  
<https://www.imf.org/es/Publications/fandd/issues/2022/12/hydrogen-decade-van-de-graaf>

Igwe, C. I., Achebe, C. H., & Chinweze, A. E. (2023). Design of an Alkaline Water Electrolyzer for Hydrogen Production. *American Journal of Mechanical and Industrial Engineering* 2022, Volume 7, Page 89, 7(6), 89–98. <https://doi.org/10.11648/J.AJMIE.20220706.12>

La década del hidrógeno. (n.d.). Retrieved October 9, 2023, from  
<https://www.imf.org/es/Publications/fandd/issues/2022/12/hydrogen-decade-van-de-graaf>

López-Fernández, E., Sacedón, C. G., Gil-Rostra, J., Yubero, F., González-Elipe, A. R., & de Lucas-Consuegra, A. (2021). Recent Advances in Alkaline Exchange Membrane Water Electrolysis and Electrode Manufacturing. *Molecules* 2021, Vol. 26, Page 6326, 26(21), 6326. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES26216326>

Ministerio de minas y energía. (s. f.). Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia. Recuperado 9 de septiembre de 2023, de  
[https://www.minenergia.gov.co/documents/5861/Hoja\\_Ruta\\_Hidrógeno\\_Colombia\\_2810.pdf](https://www.minenergia.gov.co/documents/5861/Hoja_Ruta_Hidrógeno_Colombia_2810.pdf)

Phillips, R., Edwards, A., Rome, B., Jones, D. R., & Dunnill, C. W. (2017). Minimising the ohmic resistance of an alkaline electrolysis cell through effective cell design. *International Journal*

of Hydrogen Energy, 42(38), 23986–23994.  
<https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2017.07.184>

Sun, Z., Wang, G., Koh, S. W., Ge, J., Zhao, H., Hong, W., Fei, J., Zhao, Y., Gao, P., Miao, H., & Li, H. (2020). Solar-Driven Alkaline Water Electrolysis with Multifunctional Catalysts. *Advanced Functional Materials*, 30(27), 2002138.  
<https://doi.org/10.1002/ADFM.202002138>

Timmers, J. (2022). Design of a lab-scale “zero-gap” water electrolyser.

Verde, azul o negro: los distintos tipos de hidrógeno - Mapas de El Orden Mundial - EOM. (n.d.). Retrieved October 9, 2023, from <https://elordenmundial.com/mapas-y-graficos/tipos-hidrogeno/>

Xia, Y., Cheng, H., He, H., & Wei, W. (2023). Efficiency and consistency enhancement for alkaline electrolyzers driven by renewable energy sources. *Communications Engineering* 2023 2:1, 2(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s44172-023-00070-7>

Xu, H. G., Zhang, X. Y., Ding, Y., Fu, H. Q., Wang, R., Mao, F., Liu, P. F., & Yang, H. G. (2023). Rational Design of Hydrogen Evolution Reaction Electrocatalysts for Commercial Alkaline Water Electrolysis. *Small Structures*, 4(8), 2200404.  
<https://doi.org/10.1002/SSTR.202200404>

- Yang, L., Gao, L., Shan, G., Huo, X., Zhang, M., Wang, Y., Liu, X., Kong, A., Wu, J., & Zhang, J. (2023). Recent progress of enhanced bubble separation in alkaline water electrolyzer. *Chem Synth* 2023;3:41., 3(4), N/A-N/A. <https://doi.org/10.20517/CS.2023.25>
- Zeng, K., & Zhang, D. (2010). Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), 307–326. <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2009.11.002>