

Producción de hidrógeno mediante electrolisis: avances y retos en la ingeniería electrónica

Yaobang Jaime Espinosa

Asesor

Amainen Guillén Pacheco

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería ECBTI

Ingeniería Electrónica

2025

Dedicatoria

A mi esposa e hija que gracias a su amor y cariño he podido formar excelentes valores y sentimientos que me han servido muchas veces para afrontar momentos álgidos y difíciles de la vida. Esta monografía es un tributo a su comprensión y paciencia a lo largo de este viaje académico. Miro hacia atrás y observo con regocijo que gracias a su apoyo este trabajo es otro logro que juntos lo hicimos realidad.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme salud y vida por dejarme culminar esta monografía de la mejor manera, a mi esposa e hija que desde siempre han sido el motor de mi vida que impulsa cada uno de mis esfuerzos y son un motivo muy fuerte para continuar hacia adelante. A los profesores de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) que me brindaron su acompañamiento y paciencia, en especial a mi asesor Amaimen Guillén Pacheco que gracias a su guía fue fundamental para el desarrollo de este estudio.

A todos les expreso mi más sincera gratitud.

Resumen

La producción de hidrógeno mediante electrólisis del agua se perfila como una tecnología esencial para la transición hacia energías limpias. Este proceso, que separa el agua en hidrógeno y oxígeno usando electricidad renovable, permite generar hidrógeno verde, fundamental para la descarbonización. Sin embargo, aún enfrenta limitaciones como el alto costo de los electrolizadores, la eficiencia moderada y la compleja integración con fuentes renovables intermitentes. Esta monografía analizó estos desafíos desde la ingeniería electrónica, evaluando tecnologías de electrólisis como la alcalina (AE), la de membrana de intercambio protónico (PEM) y la de óxidos sólidos (SOEC). Se destacó el papel crítico de los sistemas electrónicos de control para optimizar el proceso, reducir pérdidas y mejorar la estabilidad operativa. Además, se discutieron barreras económicas y técnicas vinculadas con el costo de equipos, la necesidad de infraestructura y las dificultades de almacenamiento y distribución del hidrógeno.

El estudio identificó soluciones innovadoras desde la electrónica. Primero, convertidores de alta frecuencia y controladores MPPT permitieron reducir hasta un 15% el consumo energético en sistemas PEM al adaptarse a la variabilidad de las energías renovables. Segundo, sensores avanzados basados en nanomateriales orgánicos alcanzaron un 98% de precisión en la detección de fugas incluso en condiciones exigentes. Tercero, algoritmos de control predictivo apoyados en gemelos digitales optimizaron la operación en tiempo real, aumentando la eficiencia global entre 8% y 12% respecto a controladores PID. También se examinó el contexto colombiano, donde La Guajira presenta un alto potencial eólico que favorece proyectos competitivos de hidrógeno verde, mientras que Buenaventura enfrenta mayores costos energéticos que limitan su viabilidad. En conjunto, la electrónica de potencia, el monitoreo inteligente y el control adaptativo se consolidan como pilares clave para la escalabilidad técnica

y económica de la electrólisis y para avanzar hacia los Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con energía limpia y acción climática.

Palabras clave: electrólisis, hidrógeno verde, ingeniería electrónica, energías renovables, control inteligente.

Abstract

Hydrogen production through water electrolysis is emerging as an essential technology for the transition toward clean energy. This process, which splits water into hydrogen and oxygen using renewable electricity, enables the generation of green hydrogen, a key component for decarbonization. However, it still faces limitations such as the high cost of electrolyzers, moderate efficiency, and the complex integration with intermittent renewable sources. This monograph analyzed these challenges from an electronic engineering perspective, evaluating electrolysis technologies such as alkaline electrolysis (AE), proton exchange membrane (PEM), and solid oxide electrolysis cells (SOEC). The critical role of electronic control systems was highlighted, as they optimize the process, reduce losses, and improve operational stability. Additionally, the study discussed economic and technical barriers related to equipment costs, infrastructure requirements, and the challenges associated with hydrogen storage and distribution.

The research identified innovative solutions enabled by electronics. First, high-frequency converters and MPPT controllers allowed for up to a 15% reduction in energy consumption in PEM systems by adapting to the variability of renewable energy sources. Second, advanced sensors based on organic nanomaterials achieved 98% accuracy in leak detection, even under demanding conditions. Third, predictive control algorithms supported by digital twins optimized real-time operation, increasing overall efficiency by 8% to 12% compared to traditional PID controllers. The Colombian context was also examined, highlighting La Guajira as a region with high wind potential that favors competitive green hydrogen projects, while Buenaventura faces higher energy costs that limit its feasibility. Overall, power electronics, intelligent monitoring, and adaptive control are consolidated as key pillars for the technical and economic scalability of

electrolysis and for progress toward Sustainable Development Goals related to clean energy and climate action.

Keywords: electrolysis, green hydrogen, electronic engineering, renewable energy, intelligent control.

Tabla de Contenido

| | |
|--|----|
| Introducción | 12 |
| Planteamiento del Problema..... | 15 |
| Justificación..... | 17 |
| Objetivos | 19 |
| Objetivo General | 19 |
| Objetivos Específicos | 19 |
| Metodología | 20 |
| Enfoque de la Investigación | 20 |
| Tipo de Estudio | 20 |
| Método de Investigación | 20 |
| Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información | 20 |
| Criterios de Selección de la Información | 21 |
| Población y Muestra | 21 |
| Técnicas de Análisis | 22 |
| Limitaciones del Estudio | 22 |
| Marco Teórico..... | 23 |
| Fundamentos de la Electrólisis del Agua | 23 |
| Electrolizador | 24 |
| Tipos de Electrolizadores | 25 |
| Electrolizador alcalino (AWE) | 25 |
| Electrolizador de membrana de intercambio de protones (PEM)..... | 26 |
| Electrolizador de óxido sólido (SOEC) | 26 |
| Comparación de tecnologías de electrolisis | 27 |
| Principales Aplicaciones del Hidrógeno Verde..... | 29 |

| | |
|--|----|
| De la Ingeniería Electrónica en la Electrólisis | 32 |
| Importancia de la Ingeniería Electrónica en la Electrólisis | 32 |
| Electrónica de Potencia..... | 32 |
| Sistemas de Control | 33 |
| Sensorización y Monitoreo | 33 |
| Digitalización e integración con Energías Renovables | 33 |
| Resultados y Discusión | 35 |
| Resultados | 35 |
| Eficiencia de los Electrolizadores | 35 |
| Sensorización y Monitoreo..... | 35 |
| Controladores Electrónicos Avanzados..... | 36 |
| Integración con Energías Renovables | 36 |
| Discusión..... | 38 |
| Contribuciones de este estudio al campo de la ingeniería electrónica | 39 |
| Conclusiones | 41 |
| Recomendaciones..... | 43 |
| Fomentar la Investigación en Materiales Alternativos y Durables | 43 |
| Mejorar la Interoperabilidad y la Estandarización | 43 |
| Invertir en Automatización Inteligente y Digitalización | 44 |
| Promover el Desarrollo de Gemelos Digitales y Simulación Avanzada..... | 44 |
| Impulsar Políticas y Financiamiento Para la Integración Renovable..... | 44 |
| Fortalecer la Formación Interdisciplinaria y la Transferencia Tecnológica..... | 45 |
| Potenciar la Seguridad, la Gestión de Riesgos y la Sostenibilidad | 45 |
| Referencias bibliográficas..... | 46 |

Lista de tablas

Tabla 1 *Comparación de Electrólizadores* 28

Tabla 2 *Tecnologías de Electrólisis y la Integración con la Ingeniería Electrónica* 37

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 <i>Como se Produce la Electrólisis</i> | 24 |
| Figura 2 <i>Tipos de Electrólizadores</i> | 27 |
| Figura 3 <i>Aplicaciones del Hidrógeno Verde</i> | 31 |

Introducción

El hidrógeno verde se ha producido principalmente dividiendo el agua mediante electrólisis, utilizando electricidad de fuentes renovables como la solar o la eólica, lo que ha evitado la emisión de gases de efecto invernadero y lo ha convertido en una alternativa sostenible para la transición energética (EDP España, 2024). Sin embargo, este proceso químico enfrenta una serie de desafíos tecnológicos y económicos que ha dificultado su implementación a gran escala. Entre dichos desafíos se han encontrado la necesidad de reducir los costos de producción, optimizar los electrodos y gestionar las variables relacionadas con las fuentes de energía renovable (Centi et al., 2019, traducción propia).

Además, es importante señalar que “la mayor parte del hidrogeno mundial se produce a partir de combustibles fósiles mediante reformado con vapor y gasificación de carbón, mientras que la electrolisis representa menos del 5% de la producción total, aunque su crecimiento es acelerado” (IEA, 2023, traducción propia). También hay factores logísticos que juegan un papel crucial para quienes buscan dedicarse a la producción masiva y que deben tener en cuenta, como son la seguridad, eficiencia y costo, así como el almacenamiento y el transporte de este (iSE-Latam, 2025). El hidrógeno ha sido considerado como el elemento más abundante en el universo conocido y posee la mayor densidad energética por unidad de masa, alcanzando los 120 MJ/kg (Principia Ingenieros, 2023).

Aunque en la Tierra está compuesta principalmente por agua, los compuestos orgánicos como los hidrocarburos han sido considerados como las principales fuentes de producción de energía, relegando al hidrogeno a un segundo plano, ya que requiere de un proceso de producción más costoso y aún incipiente (Benavente, 2021). La primera producción artificial de hidrógeno fue lograda mediante electrólisis en el siglo XIX y a su vez se desarrolló el primer

motor de combustión interna que utilizaba hidrógeno (Iberdrola, 2022; Diariomotor, 2010).

El hidrógeno líquido (*LH2*) se emplea como combustible en el histórico viaje del hombre a la Luna. Como vector energético, el hidrógeno ofrece ventajas sobre los combustibles fósiles, ya que permite almacenar energía eléctrica y, al ser producido mediante electrólisis con energía renovable, contribuye a un ciclo de producción y consumo de energía sin emisiones de carbono (Naturgy, 2025).

La creciente preocupación por el cambio climático y la necesidad de adoptar fuentes de energía más limpias y sostenibles impulsan el desarrollo de nuevas tecnologías en el sector energético. Entre las soluciones más prometedoras para descarbonizar sectores clave, destaca el hidrógeno, considerado un vector energético de gran potencial. Cuando se produce mediante la electrólisis, el hidrógeno puede sustituir los combustibles fósiles en diversas aplicaciones, incluyendo el transporte, la industria y el almacenamiento de energía (Fastech, 2023).

El proceso de electrólisis del agua, que implica la separación de esta en hidrógeno y oxígeno mediante el uso de electricidad, ha revelado una de las formas más limpias de producción de hidrógeno, especialmente si la electricidad proviene de fuentes renovables. Este tipo de hidrógeno, conocido como hidrógeno verde, se ha caracterizado por no generar emisiones contaminantes, lo que lo posiciona como un elemento clave en la lucha contra el cambio climático (Hidrogeno, s.f.).

Desde la perspectiva de la ingeniería electrónica, mejorar la eficiencia en la producción de hidrógeno a través de electrólisis requiere un profundo entendimiento y optimización de los sistemas electrónicos involucrados en el proceso. La integración de electrolitos, sistemas de control electrónico y electrónica de potencia han resultado fundamental para incrementar la

eficiencia de los electrolizadores y reducción en los costos de producción. Además, el diseño de infraestructuras inteligentes para el almacenamiento y distribución del hidrógeno ha sido crucial para facilitar su adopción (Fastech, 2023).

Esta monografía ha tenido como objetivo abordar los avances tecnológicos y los desafíos actuales en la producción de hidrógeno mediante electrólisis, centrándose en los aspectos relacionados con la ingeniería electrónica. La monografía ha contado con una metodología con un enfoque cualitativo donde se desarrolla una revisión bibliográfica de tipo descriptivo y analítico. Se han analizado las tecnologías actuales de electrólisis, los sistemas de control electrónico y las estrategias para integrar energías renovables en estos procesos, con el fin de identificar oportunidades de mejora que permiten una transición más ágil hacia un sistema energético más limpio y eficiente por medio de una revisión técnica y científica, buscando aumentar el entendimiento que ayude a avanzar hacia un sistema energético más limpio, eficiente y sostenible.

En este contexto, el presente trabajo analiza los avances y retos de la producción de hidrógeno por electrólisis, haciendo especial énfasis en las contribuciones recientes de la ingeniería electrónica para mejorar la eficiencia integración y sostenibilidad del proceso.

Planteamiento del Problema

La degradación del medio ambiente se encuentra estrechamente relacionada con la dependencia de los combustibles fósiles y el uso ineficiente de los recursos energéticos, lo cual ha incrementado las emisiones de gases de efecto invernadero y acelerado el cambio climático. Aunque las energías renovables han ganado espacio en la matriz energética global, aún existen barreras tecnológicas y económicas que limitan su adopción masiva. En Colombia, a pesar del gran potencial eólico y solar, el país mantiene una fuerte dependencia de las fuentes convencionales y enfrenta desafíos en la infraestructura para el almacenamiento y distribución de energía (Climatico, 2023; Structuralia, 2024).

La producción de hidrógeno verde mediante electrólisis del agua se presenta como una alternativa viable para avanzar hacia una matriz energética más limpia y sostenible. Sin embargo, esta tecnología enfrenta problemas significativos asociados con los altos costos de producción, la eficiencia energética limitada y la dificultad de escalabilidad a nivel industrial. Estos obstáculos reducen la competitividad del hidrógeno frente a otras fuentes energéticas y retrasan su incorporación en sectores estratégicos como el transporte, la industria y el almacenamiento energético (Mediavilla, 2022).

Más allá de los retos químicos y económicos, existe un problema específico ligado al campo de la ingeniería electrónica: los sistemas de electrólisis dependen de la calidad de la electrónica de potencia, de los sistemas de control y de sensores de avanzada para alcanzar un funcionamiento estable y eficiente. Actualmente, los convertidores presentan pérdidas energéticas significativas, los controladores tradicionales no siempre responden adecuadamente a la variabilidad de las fuentes renovables, y los sensores de hidrógeno aún enfrentan limitaciones en costo, precisión y durabilidad. Estas deficiencias reducen la confiabilidad de los

electrolizadores, incrementan los costos de operación y dificultan la integración de la electrólisis con fuentes renovables intermitentes (David, 2024).

Por lo tanto, el problema central que aborda este estudio consiste en la necesidad de optimizar los sistemas electrónicos aplicados a la electrólisis del agua, incluyendo electrónica de potencia, control inteligente y sensores de avanzada; con el fin de mejorar la eficiencia, reducir los costos y favorecer la masificación del hidrógeno verde como vector energético en contextos como el colombiano (Jaimes Rincon, 2023).

Justificación

La relación entre los seres humanos y el medio ambiente ha sido fundamental y es imperativo replantear la manera en que satisfacen las necesidades biológicas y materiales sin comprometer el ecosistema. Es vital prestar atención cómo el entorno afecta el desarrollo económico, social y cultural, promoviendo un uso responsable de los recursos naturales a través de una gestión ambiental que involucre a la sociedad en la planificación y supervisión. Todos los actores sociales han reconocido el medio ambiente como un sistema interconectado y dinámico, lo que ha requerido un enfoque integrado y multidisciplinario para la creación de políticas de desarrollo sostenible (Kain, 2023).

En Colombia, la transición de fuentes de energía convencionales a energías renovables ha resultado crucial, especialmente en el contexto del cambio climático y las crecientes demandas energéticas. Aunque el país ha aprovechado la energía hidráulica, enfrenta retos considerables debido a la necesidad de electrificar zonas con alta demanda y escasos niveles de agua en los embalses. Esto ha demandado una transformación del sector eléctrico que fomenta la innovación y la eficiencia, donde las empresas se han destacado por su capacidad de innovar y desarrollar tecnología (Climatico, 2023).

Además, ha sido esencial formular estrategias que faciliten una producción y suministro de energía más sostenibles, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero. Este trabajo resalta la relevancia de la producción de hidrógeno verde y la foto electrocatálisis como métodos para impulsar energías limpias y contribuir a la sostenibilidad ambiental en Colombia. La generación de hidrógeno a través de electrólisis se ha presentado como una de las soluciones más prometedoras para avanzar hacia un sistema energético limpio, sostenible y descarbonizado. Al combinarse con fuentes renovables como la solar o la eólica, la electrólisis produce hidrógeno

verde, un combustible libre de emisiones que puede aplicarse en diversas áreas, desde el almacenamiento de energía hasta la movilidad y la industria (Orejuela, 2023).

Esta tecnología ha tenido un potencial inmenso para contribuir a la revolución energética y disminuir la dependencia de los combustibles fósiles. Desde el ámbito de la ingeniería electrónica, esta tecnología ha abierto un extenso campo de investigación y desarrollo. La optimización de los sistemas de control electrónico y la mejora de los dispositivos para la conversión eficiente de energía son claves para aumentar la eficiencia energética del proceso de electrólisis. Además, la electrónica de potencia, que regula y adapta la energía para la electrólisis, ha desempeñado un papel fundamental en la reducción de pérdidas energéticas y en la mejora de la fiabilidad de los sistemas (Kain, 2023).

A pesar de las ventajas que presenta la electrólisis, el elevado costo de producción de los electrolizadores y la limitada eficiencia energética de los sistemas actuales constituyen obstáculos significativos para su adopción a gran escala (Kain, 2023).

Estos desafíos, junto con la necesidad de establecer una infraestructura adecuada para el almacenamiento y distribución del hidrógeno, enfatizan la urgencia de avanzar en las mejoras tecnológicas en este ámbito. Este estudio resulta esencial para los ingenieros electrónicos que buscan desarrollar tecnologías capaces de optimizar la producción de hidrógeno, superar los retos existentes y facilitar su integración efectiva en sistemas energéticos más amplios. Esta investigación se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU, especialmente con el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante) y el ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura), ya que contribuirá al entendimiento y alternativas de tecnologías limpias, sostenibles y accesibles para la sociedad (Orejuela, 2023).

Objetivos

Objetivo General

Analizar los avances y desafíos de la producción de hidrógeno por electrólisis desde la ingeniería electrónica, identificando oportunidades de mejora en eficiencia, control e integración con energías renovables para su implementación sostenible.

Objetivos Específicos

Describir los principios fundamentales y las tecnologías actuales de electrólisis del agua a partir de fuentes bibliográficas especializadas, para una comprensión integral del funcionamiento y de las implicaciones tecnológicas del proceso.

Evaluar el desempeño energético y económico de los sistemas electrónicos en electrolizadores mediante el análisis de sus componentes, para la identificación de limitaciones y el reconocimiento de oportunidades de mejora.

Analizar el impacto de las tecnologías alcalina, PEM y de óxido sólido desde la electrónica de control y potencia, a través de la revisión de sus características operativas y requerimientos electrónicos, para una determinación precisa de su aporte a la eficiencia y sostenibilidad del proceso de producción de hidrógeno.

Investigar las estrategias de integración de energías renovables con sistemas de electrólisis, a partir de casos de estudios y modelos de acoplamiento energético, para la consolidación de esquemas de producción de hidrógeno verde eficientes y estables.

Proponer soluciones tecnológicas desde la ingeniería electrónica basadas en tendencias y avances recientes en control y conversión de energía, para el fortalecimiento de la eficiencia, la reducción de costos y la ampliación del potencial de escalabilidad en el contexto colombiano.

Metodología

Enfoque de la Investigación

En este estudio se ha utilizado un enfoque cualitativo, enfocado en la indagación, análisis y comprensión de datos teóricos y técnicos sobre la generación de hidrógeno a través de la electrólisis. Se ha puesto especial atención en los progresos y retos desde el punto de vista de la ingeniería electrónica. Esta estrategia ha facilitado una interpretación del fenómeno, sin basarse en cifras (Hernández Sampieri et al, 2014).

Tipo de Estudio

Este estudio es documental y descriptivo, ya que se ha considerado documental porque se fundamenta en la revisión y análisis de información previamente publicada. Para ello, se revisaron y analizaron un total de 51 fuentes entre artículos científicos, libros, informes técnicos y tesis relacionados con la generación de hidrógeno por electrólisis, especialmente desde la perspectiva de la ingeniería electrónica. La selección de estos documentos se basó en su relevancia, actualidad y aporte al contexto colombiano. Todas las fuentes consultadas y analizadas se encuentran debidamente referenciadas en la bibliografía de este trabajo.

Método de Investigación

Se ha aplicado un método analítico-descriptivo, que ayuda a organizar la información reunida, identificar los principales avances en ingeniería electrónica aplicados al proceso de electrólisis y evaluar los desafíos actuales que enfrenta esta tecnología. Este enfoque también ha permitido proponer mejoras a partir del análisis comparativo de distintas técnicas tecnológicas.

Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información

Para la obtención de los datos se han utilizado las siguientes técnicas:

Revisión bibliográfica sistemática, con el fin de localizar y seleccionar fuentes académicas y técnicas pertinentes y actualizadas sobre el tema.

Se consultaron bases de datos científicas como Google Scholar, IEEE Xplore, ScienceDirect, Scopus y SpringerLink. Además, se ha recurrido a informes de organismos internacionales como la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) y la Agencia Internacional de la Energía (IEA).

Las palabras clave empleadas en la búsqueda incluyeron: electrólisis del agua, producción de hidrógeno, hidrógeno verde, ingeniería electrónica, eficiencia energética, electrónica de potencia, tecnologías limpias, entre otras.

Criterios de Selección de la Información

Los documentos seleccionados han completado con los siguientes criterios:

Actualidad: se priorizaron publicaciones de los últimos 5 a 10 años.

Pertinencia: conexión directa con los objetivos de la investigación.

Rigor científico: se incluyeron publicaciones académicas, técnicas o institucionales respaldadas por expertos.

Fiabilidad: se eligieron autores reconocidos, revistas indexadas y fuentes comprobables.

Población y Muestra

Como esta ha sido una investigación documental, no se aplica una población o muestra en el sentido convencional. En cambio, la muestra está constituida por el conjunto de documentos técnicos y científicos seleccionados para el análisis, de acuerdo con los criterios previamente mencionados.

Técnicas de Análisis

Se ha llevado a cabo un estudio comparativo y temático de los documentos recopilados. Este estudio facilitó reconocer y clasificar los temas más importantes, como son los tipos de electrólisis, avances en aparatos electrónicos, eficacia en el uso energético, desafíos económicos y tecnológicos, entre otros. Así como evaluar y comparar las distintas tecnologías y enfoques utilizados para producir hidrógeno. Para finalmente, investigar de qué manera la ingeniería electrónica ayuda a mejorar el proceso de electrólisis.

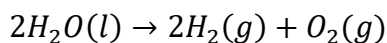
Limitaciones del Estudio

La principal limitación de esta investigación ha radicado en la ausencia de acceso a ciertas fuentes técnicas y patentes industriales que no son de acceso público. Además, al tratarse de un estudio documental, no se ha incluido la recolección de datos en el campo ni experimentación práctica, lo que limita la validación empírica de las propuestas.

Marco Teórico

Fundamentos de la Electrólisis del Agua

La electrólisis del agua es un proceso electroquímico en el cual se utiliza energía eléctrica para descomponer el agua en sus componentes básicos: hidrogeno y oxígeno. Este proceso ocurre en una celda electrolítica compuesta por dos electrodos (ánodo y cátodo) sumergidos en una solución electrolítica. Cuando se aplica una corriente continua, se produce la siguiente reacción global:



En el cátodo ocurre una reacción de reducción, donde los protones (H^+) ganan electrones y forman hidrogeno molecular. En el ánodo, el agua cede electrones y se oxida, generando oxígeno (Parra et al, 2019).

A condiciones estándar (25°C , 1 atm), la electrolisis requiere una diferencia de potencial mínima de 1.23 V. No obstante, debido a las pérdidas generadas por la resistencia del sistema, materiales y sobrepotenciales en los electrodos, los valores prácticos oscilan entre 1.6 y 2.0 Volts (Fasihi et al, 2016).

La diferencia del sistema dependerá de factores como la temperatura, la composición del electrolito, el tipo de electrolizador empleado y la gestión electrónica del suministro energético.

El hidrogeno producido mediante electrolisis se considera “verde” cuando la energía eléctrica proviene de fuentes renovables, como la solar, eólica o hidráulica, lo que elimina las emisiones de gases de efecto invernadero en el proceso (International Energy Agency, 2022).

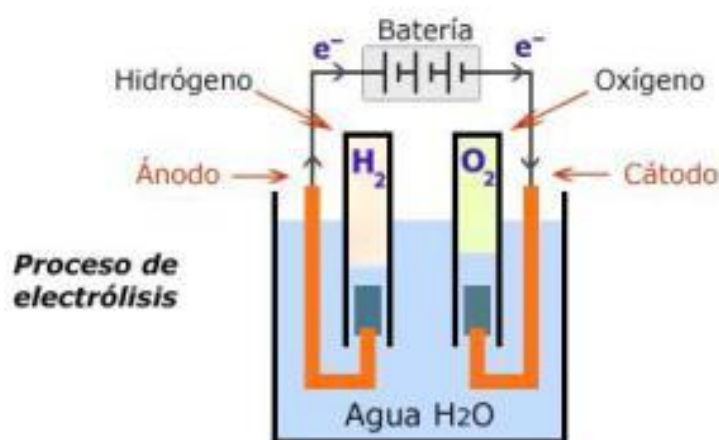
La ingeniería electrónica desempeña un rol esencial en la regulación de la corriente y el voltaje mediante dispositivos como convertidores DC-DC y DC-AC, los cuales permiten adaptar

y estabilizar las condiciones de operación del sistema electrolítico (Bhandari et al, 2014).

Además, la incorporación de sensores inteligentes, sistemas de control PWM (modulación ancha de pulso) y algoritmos de seguimiento como MPPT (Maximum Power Point Tracking) hacen posible una operación altamente eficiente, incluso bajo variaciones de carga o intermitencias en la fuente de energía renovable (Hosseini et al, 2023).

Figura 1

Como se Produce la Electrólisis



Nota. La imagen muestra un esquema del proceso de electrólisis del agua. En este proceso, se utiliza una batería para aplicar corriente eléctrica a través del agua (H_2O), separándola de sus componentes: hidrógeno y oxígeno. El diagrama ilustra el flujo de electrones y la formación de ambos gases a partir del agua Tomado de (fabitroncoso, s.f.).

Electrolizador

Es un dispositivo que genera hidrógeno mediante un procedimiento conocido como electrólisis, el cual divide las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno al utilizar electricidad. Este enfoque ha sido sostenible, ya que no produce dióxido de carbono, lo que lo hace

fundamental para una economía sin carbono. Aunque la electrólisis puede parecer sencilla, semejante a un experimento en un laboratorio, su efecto en la generación de hidrógeno verde es significativo.

El hidrógeno ha sido el elemento más frecuente en el cosmos y se considera un combustible excelente, ya que al quemarse solo genera vapor de agua y no produce dióxido de carbono. Esto ayuda a disminuir considerablemente las emisiones de gases que contribuyen al calentamiento global. Sin embargo, la obtención de hidrógeno demanda energía eléctrica. Si esta energía proviene de fuentes fósiles, se generarán emisiones, pero si se recurre a energías renovables, se consigue hidrógeno verde. Aquí es donde desempeñan un papel fundamental los electrolizadores (Iberdrola, 2024).

Los electrolizadores operan dividiendo las moléculas de agua en oxígeno e hidrógeno. Para llevar a cabo esta división, es necesario proporcionar energía eléctrica. A medida que estos dispositivos se hacen más eficaces, su uso se extiende a diferentes sectores industriales y a pilas de combustible que han utilizado hidrógeno. Uno de los electrolizadores más grandes del mundo se encuentra en Fukushima, Japón, y su energía proviene de fuentes solares. Recientemente, el electrolizador de Betancourt en Canadá ha superado a otros, logrando una producción destacada de 8,2 toneladas de hidrógeno diarias (Iberdrola, 2024).

Tipos de Electrolizadores

Existen varios tipos de electrolizadores, clasificados según el material del electrolito y las características tecnológicas. Los principales son:

Electrolizador alcalino (AWE)

Estos dispositivos utilizan una solución líquida electrolítica, como el hidróxido potasio y

el hidróxido de sodio, combinada con agua. En una celda, el hidrógeno se produce mediante un ánodo, un cátodo y una membrana. Generalmente, las celdas se conectan en serie para generar al mismo tiempo una mayor cantidad de hidrógeno y oxígeno. Cuando se aplica corriente a la pila de electrólisis, los iones de hidróxido se mueven a través del electrolito desde el cátodo al ánodo en cada celda, creando burbujas de hidrógeno en el cátodo del electrolizador y oxígeno en el ánodo. Este tipo de electrolizador ha sido utilizado durante más de cien años y no requiere metales preciosos como catalizadores; sin embargo, son unidades grandes que producen hidrógeno con un nivel medio de pureza y no ofrecen gran flexibilidad en su funcionamiento (Iberdrola, 2024).

Electrolizador de membrana de intercambio de protones (PEM)

Los electrolizadores PEM utilizan una membrana de intercambio de protones y un electrolito sólido de polímero. Al aplicar corriente a la pila, el agua se separa en hidrógeno y oxígeno, y los protones de hidrógeno cruzan la membrana para formar gas hidrógeno en el cátodo. Estos han sido los más comunes ya que han generado hidrógeno de alta pureza y son fáciles de refrigerar. Se han adaptado perfectamente a la variabilidad de las fuentes de energía renovables, son compactos y producen hidrógeno de gran pureza. No obstante, el precio es más elevado debido a la utilización de metales preciosos como catalizadores (Iberdrola, 2024).

Electrolizador de óxido sólido (SOEC)

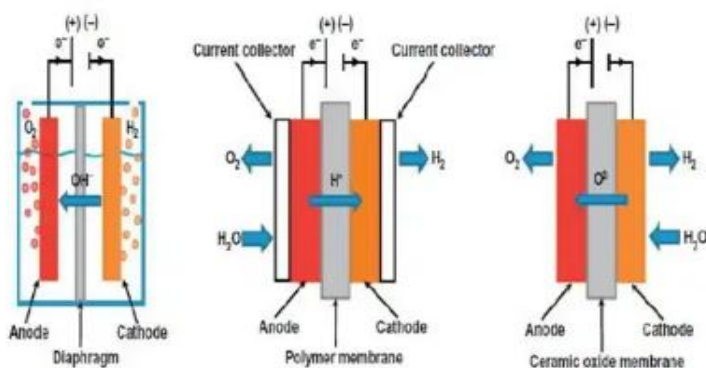
Los SOEC operan a temperaturas elevadas (entre 500 y 850 °C) y puede ser considerablemente más eficientes que los PEM y alcalinos. Este proceso se ha conocido como electrólisis a alta temperatura (HTE) o por vapor y utiliza un material cerámico sólido como electrolito. Los electrones del circuito externo se combinan con agua en el cátodo para generar gas hidrógeno y los iones negativos. Luego, el oxígeno pasa a través de la membrana cerámica

deslizante y reacciona en el ánodo, produciendo gas oxígeno y electrones que regresan al circuito externo. Desde una perspectiva tecnológica, estos electrolizadores son menos avanzados que los anteriores

Existen otros tipos de electrolizadores que, aunque su eficiencia o rentabilidad no igualan a los mencionados, muestran un gran potencial de desarrollo. Un ejemplo es la foto electrólisis, que se ha basado únicamente en la luz solar para descomponer las moléculas de agua, sin necesidad de electricidad. Sin embargo, este sistema depende de semiconductores que todavía no han alcanzado un desarrollo óptimo (Iberdrola, 2024).

Figura 2

Tipos de Electrolizadores



Nota. De izquierda a derecha un electrolizador AWE, un PEM y un SOEC. Tomado de Transición Energética (2024).

Comparación de tecnologías de electrolisis

La comparación entre las principales tecnologías de electrolisis -alcalina (AWE), de membrana de intercambio de protones (PEM) y el óxido sólido (SOEC) – es esencial para

seleccionar la alternativa más adecuada según el contexto técnico, económico y ambiental. Cada una presenta ventajas y desventajas en aspectos como eficiencia, costos, pureza del hidrogeno, condiciones de operación y aplicaciones preferentes (Asociación Española del Hidrogeno [AeH2], 2020).

Tabla 1

Comparación de Electrolizadores

| Característica | Electrolizador alcalino (AWE) | Electrolizador PEM | Electrolizador SOEC |
|---|-----------------------------------|----------------------------------|---|
| Madurez tecnológica | Muy consolidada | Comercial en expansión | Experimental/Piloto |
| Eficacia típica (%) | 60-75% | 65-90% | 80-90% |
| Costo estimado (USD/Kg H ₂) | 4-6 | 5-7 | 7-10 |
| Pureza del hidrogeno | 99.8% | >99.99% | Muy alta |
| Condiciones de operación | 60-90°C, KOH/NaOH | 50-80°C Agua pura | 700-1000°C Electrolítico cerámico |
| Ventajas principales | Bajo costo, robustez | Alta pureza, respuesta flexible | Alta eficiencia, usa calor residual |
| Desventajas principales | Menor eficiencia y flexibilidad | Costo elevado, metales nobles | Tecno, experimental, materiales costosos |
| Aplicaciones preferentes | Industria/producción centralizada | Alta pureza, energías renovables | Procesos industriales con calor residual. |

Nota. Adaptado desde Fundacion Naturgy (2021).

Como se muestra en la tabla 1, la electrolisis alcalina destaca por su madurez tecnológica, bajos costos y facilidad de operación a gran escala, aunque presenta una eficiencia intermedia y menor flexibilidad ante variaciones de carga eléctrica. La tecnología PEM, por su parte es ideal para obtención de hidrogeno de alta pureza y su integración con fuentes renovables, gracias a su respuesta rápida y operación flexible, aunque implica costos superiores debido al empleo de materiales nobles. El SOEC ofrece eficiencias potencialmente superiores al aprovechar el calor residual de procesos industriales, pero su tecnología aún está en fase experimental y requiere materiales y condiciones operativas avanzadas, lo que limita su adopción actual (Fundacion Naturgy, 2021).

La selección de la tecnología depende del contexto: proyectos industriales consolidados suelen apostar por la alcalina, sistemas con renovables intermitentes prefieren PEM, y aplicaciones especializadas experimentan con SOEC (Ministerio de Minas y Energia de Colombia, 2022).

Principales Aplicaciones del Hidrógeno Verde

El uso de electricidad en el mundo está aumentando, y la Agencia Internacional de la Energía (AIE) proyecta que la demanda global de energía crecerá entre un 25 y un 30% para el año 2040. Esta situación hace que sea crucial desarrollar nuevas industrias que puedan producir energía de forma sostenible. En este contexto, el hidrógeno verde se presenta como una opción viable para enfrentar este reto. Este tipo de hidrógeno se produce mediante la electrólisis del agua utilizando energía renovable, como la solar o la eólica, lo que lo hace una alternativa ecológica, ya que no genera emisiones de gases de efecto invernadero (Muñoz, 2022).

El hidrógeno verde obtenido al separar el hidrógeno y el oxígeno del agua utilizando electricidad generada de manera limpia. Este proceso no emite dióxido de carbono y facilita el

almacenamiento de hidrógeno para varios usos, mientras que el oxígeno se libera como un subproducto. Las aplicaciones del hidrógeno verde son diversas y contribuyen a reducir la huella de carbono, incluyendo su empleo en la industria química para la producción de amoníaco, en la refinación de petróleo, en la fabricación de acero en el sector metalúrgico, como un método para almacenar energía, como combustible para el transporte y en la calefacción de viviendas (Muñoz, 2022).

En cuanto a los costos, la elaboración de un kilogramo de hidrógeno verde puede oscilar entre 6 y 7 euros, requiriendo alrededor de 34 kWh de electricidad verde. Aunque en este momento es más caro que otras fuentes de energía, se espera que el precio disminuya en el futuro. Para evaluar el costo se emplea el coste nivelado del hidrógeno (LCOH), que toma en cuenta todos los gastos asociados a su producción (Muñoz, 2022).

El hidrógeno verde ofrece varias ventajas, como la generación de energía sostenible, la disponibilidad de recursos abundantes, la versatilidad en diversas aplicaciones, la independencia energética, el fomento de una economía más sostenible. Sin embargo, también presenta algunos desafíos, como los altos costos actuales, la falta de infraestructura adecuada, eficiencias menores comparadas con otras tecnologías, la dependencia de fuentes renovables, problemas de seguridad debido a su capacidad para inflamarse.

Aunque existen diferentes formas de producción de hidrogeno, entre las que se incluyen hidrogeno verde e hidrogeno azul; la principal diferencia entre el hidrógeno verde y el hidrógeno azul radica en su manera de producción y el impacto ambiental (Muñoz, 2022).

El hidrógeno verde se obtiene de fuentes renovables sin causar emisiones, por esta razón, el hidrógeno verde es considerado más sostenible. Mientras que el hidrógeno azul se produce a partir del gas natural con captura de carbono, lo que aún implica el uso de combustibles fósiles.

El hidrógeno producido mediante electrólisis utilizando energía renovable (llamado hidrógeno verde) se emplea en transporte (vehículos de pilas de combustible), industria química (fabricación de amoníaco, refinación), generación de electricidad (almacenamiento de energía) y sistemas de calefacción y mezcla en redes de gas natural (Muñoz, 2022).

España busca posicionarse como un líder en la industria del hidrógeno verde, apoyándose en un plan nacional que define objetivos para el año 2030 y una visión a largo plazo hasta 2050. Este plan incluye la generación de 4 GW de capacidad instalada mediante electrólisis, lo que equivale al 10% del objetivo europeo, así como un 25% del uso industrial de hidrógeno obtenido de fuentes renovables para 2030, además de la creación de una flota de transporte y una red de estaciones de hidrógeno (Muñoz, 2022).

Figura 3

Aplicaciones del Hidrógeno Verde



Nota. La figura muestra como el hidrogeno verde se produce con energías renovables y se utiliza en la industria, el transporte y la generación de energía. Tomado de Good new energy (2021).

De la Ingeniería Electrónica en la Electrólisis

La producción de hidrógeno verde mediante electrólisis no depende únicamente de avances en materiales, química o infraestructura energética; su viabilidad práctica está directamente relacionada con el desarrollo de sistemas electrónicos avanzados. La ingeniería electrónica constituye el eje transversal que permite transformar, regular, controlar y supervisar la energía necesaria para que los electrolizadores funcionen de manera eficiente, segura y escalable. Los sistemas electrónicos, como fuentes de alimentación controladas y dispositivos automatizados, garantizan la operación eficiente y segura del proceso, lo que resulta clave en aplicaciones industriales y energéticas (Repsol, 2025).

Importancia de la Ingeniería Electrónica en la Electrólisis

La ingeniería electrónica ha adquirido un rol estratégico en el desarrollo de tecnologías de electrólisis más avanzadas y sostenibles. Permite la integración de energías renovables, así como la supervisión y automatización de parámetros críticos, como corriente, voltaje y temperatura, para maximizar la eficiencia y minimizar riesgos operativos. Esto contribuye a que la electrólisis sea una alternativa viable para la producción de hidrógeno verde y el avance hacia una economía más limpia (Enagás, 2024). Desde esta perspectiva, los principales aportes de la ingeniería electrónica a la electrólisis se pueden agrupar en cuatro áreas clave:

Electrónica de Potencia

La electrónica de potencia se encarga de transformar y adecuar la energía eléctrica para alimentar los electrolizadores, siendo fundamental el empleo de convertidores y rectificadores especializados. Por ejemplo, empresas como Ingeteam han desarrollado convertidores avanzados capaces de suministrar corriente continua de alta calidad y gran capacidad, lo que posibilita la operación de electrolizadores a escala industrial (Ingeteam, 2023; Repsol, 2025). Además, las

topologías electrónicas aplicadas buscan optimizar la eficiencia y la adaptación a distintas fuentes energéticas (Universidad politécnica de Madrid [UPM], 2023).

Sistemas de Control

Los sistemas de control automático, como PLCs y controladores PID, resultan indispensables para el funcionamiento seguro y eficiente de la electrolisis. Estos sistemas ajustan en tiempo real parámetros críticos, optimizan la producción y permiten la integración con plataformas de monitoreo remoto tipo SCADA, fundamentales para la operación automatizada en entornos industriales (Rosetta Technology, s.f.).

Sensorización y Monitoreo

El censado y monitoreo electrónico posibilita la recolección y análisis en tiempo real de variables clave durante el proceso de electrólisis. Mediante sensores y sistemas SCADA, se supervisan parámetros como temperatura, presión, pureza del hidrógeno y consumo eléctrico, lo que incrementa la seguridad operacional, permite mantenimiento predictivo y reduce fallas en los equipos (Collina, 2025; Electronics, 2024; Energy, 2025; Girao, 2024; Kumarage, 2023; Latam, s.f.; Mandal, 2025; Reports, 2024; Springer, 2024; Vivekananthan, 2024).

Digitalización e integración con Energías Renovables

La integración de energías renovables, como la solar y la eólica, en los sistemas de electrolisis requiere una gestión electrónica capaz de adaptar la operación del electrolizador a las variaciones y la intermitencia de la fuente energética. De este modo se asegura una producción sostenible y eficiente de hidrogeno verde, aprovechando la disponibilidad de energía limpia (Ingeteam, 2023). La inteligencia artificial (IA) y la digitalización están revolucionando los sistemas de electrólisis, permitiendo gestionar datos de procesos en tiempo real, optimizar la

eficiencia mediante algoritmos inteligentes y predecir necesidades de mantenimiento. Gracias al IoT y la analítica avanzada, es posible maximizar la generación de hidrógeno y automatizar la operación, contribuyendo a la transición hacia industrias más sostenibles y flexibles (Fractal, 2024). En consecuencia, la electrónica no es un componente auxiliar en la electrólisis, sino el habilitador que conecta la disponibilidad de energía renovable con la generación de hidrógeno verde. Su aporte no solo reside en mejorar la eficiencia energética, sino en hacer posible que la electrólisis sea segura, escalable y económicamente viable en contextos industriales y nacionales como el colombiano.

Resultados y Discusión

Resultados

A continuación, se presentan los principales hallazgos obtenidos mediante el análisis de literatura científica, informes técnicos recientes y casos prácticos sobre la electrólisis para la producción de hidrógeno verde. Los resultados se estructuran en torno a ejes fundamentales para la ingeniería electrónica: eficiencia de los electrolizadores, sensorización y monitoreo, controladores electrónicos avanzados, e integración con energías renovables. Cada apartado resalta los avances y limitaciones actuales en estos ámbitos clave (Sun et al., 2025; Girão et al., 2024; Springer, 2024).

Eficiencia de los Electrolizadores

La eficiencia energética de los sistemas de electrólisis ha mejorado notablemente gracias al desarrollo de tecnologías como la membrana de intercambio protónico (PEM), alcanzando en condiciones comerciales y piloto cifras entre el 65% y 70%, con consumos energéticos de 51–55 kWh/kg H₂ en proyectos de escala industrial (U.S. Department of Energy, 2025; Sun et al., 2025). Estas mejoras se han visto potenciadas por el avance en materiales para electrodos y membranas, logrando además purzas de hidrógeno superiores al 99.999%, condición necesaria para aplicaciones energéticas y usos industriales críticos (Springer, 2024).

Sin embargo, la dependencia de catalizadores a base de metales preciosos (como platino e iridio) aún representa un desafío en términos de costos y sostenibilidad de materiales a largo plazo (Sun et al., 2025).

Sensorización y Monitoreo

La sensorización avanzada es clave para la operación eficiente y segura de sistemas de electrólisis a gran escala. En los últimos años, se ha expandido el uso de sensores

electroquímicos y orgánicos miniaturizados capaces de operar bajo condiciones extremas, detectar fugas en tiempo real y comunicar datos mediante redes IoT (Girão et al., 2024; Mandal et al., 2025). Estos avances permiten optimizar el mantenimiento predictivo, aumentar la confiabilidad y responder con rapidez ante contingencias, especialmente en entornos industriales exigentes (Collina et al., 2025; Market Growth Reports, 2024).

Controladores Electrónicos Avanzados

La implementación de convertidores de potencia y controladores PID, junto con el despliegue de sistemas SCADA y plataformas IoT, ha permitido alcanzar altos niveles de automatización y adaptabilidad. Los algoritmos de control adaptativo e inteligencia artificial ya se emplean para mantener la estabilidad de variables críticas y anticipar fallas, logrando reducir entre un 10% y 15% el consumo energético global de la instalación (Girão et al., 2024; Nature Electronics, 2024).

Estos sistemas posibilitan la integración efectiva de energías renovables, permitiendo que la electrólisis funcione de forma eficiente, incluso ante la variabilidad natural de la generación solar y eólica (Vivekananthan, 2024).

Integración con Energías Renovables

La tendencia a integrar fuentes renovables en la producción de hidrógeno es clara. Casos pioneros en Europa y Asia muestran plantas que combinan energía solar, eólica e incluso mareomotriz con electrólisis, alcanzando eficiencias totales de hasta el 50% en la conversión de energía renovable en hidrógeno utilizable (Vivekananthan, 2024; U.S. Department of Energy, 2025). Este avance contribuye a la reducción de emisiones y al desarrollo de sistemas de almacenamiento energético flexibles y sostenibles.

Tabla 2*Tecnologías de Electrólisis y la Integración con la Ingeniería Electrónica*

| Tecnología de Electrólisis | Descripción | Eficiencia | Aplicaciones | Integración con Ingeniería Electrónica |
|-------------------------------------|---|------------|---|--|
| Electrólisis Alcalina (AEL) | Electrodos de níquel en solución alcalina (KOH); tecnología madura y de bajo costo. | 65-70% | Producción a gran escala, menor pureza requerida. | Control y regulación de corriente con sistemas electrónicos convencionales. |
| Electrólisis PEM | Membrana polimérica que permite paso de protones; requiere agua ultra pura. | 70-80% | Hidrógeno de alta pureza para transporte e industria. | Electrónica de potencia avanzada para manejo dinámico y sensores integrados. |
| Electrólisis de Óxido Sólido (SOEC) | Opera a alta temperatura (700-1000 °C); alta eficiencia energética. | 80-90% | Uso industrial con calor residual disponible. | Sistemas electrónicos para control térmico y optimización energética. |

Nota. Tomado de Brey (2023); Iberdrola (2023); Ideagreen (2025); Senza Hydrogen (2025).

El análisis comparativo evidencia que la electrónica juega un papel diferenciador en el desempeño de cada tecnología. Mientras que la electrólisis alcalina utiliza sistemas de control y conversión relativamente básicos, la tecnología PEM requiere electrónica de potencia avanzada e integración con algoritmos inteligentes para adaptarse a la variabilidad renovable. Por su parte, los electrolizadores de óxido sólido presentan un gran potencial de eficiencia, pero dependen fuertemente de la fiabilidad de sensores y componentes electrónicos capaces de soportar condiciones extremas de temperatura.

Discusión

La discusión a continuación valora, desde una perspectiva crítica e integradora, el significado de los avances y las limitaciones tecnológicas identificados en los resultados. Igualmente, reflexiona sobre el papel transformador que la ingeniería electrónica y las nuevas tecnologías digitales desempeñan en la viabilidad y el escalamiento del hidrógeno verde como vector energético del futuro.

La ingeniería electrónica emerge como el pilar fundamental para la evolución de la producción de hidrógeno verde a partir de electrólisis. La mejora de la eficiencia de los electrolizadores (U.S. Department of Energy, 2025; Sun et al., 2025) se apoya directamente en el desarrollo de nuevos materiales, controladores de potencia y sistemas inteligentes de gestión energética.

No obstante, aún persisten limitaciones notables. Entre las principales se destacan el costo elevado y la disponibilidad limitada de materiales catalíticos, la necesidad de mayores avances en la interoperabilidad entre dispositivos de distintos fabricantes y la estandarización de protocolos de comunicación industrial (Sun et al., 2025; Mandal et al., 2025). Además, la operación continua en ambientes exigentes expone a sensores y controladores a condiciones de

desgaste y fallo, lo que exige soluciones para el mantenimiento predictivo y la robustez a largo plazo (Collina et al., 2025).

Por otro lado, el despliegue futuro de la inteligencia artificial promete una revolución en la gestión y el control de plantas de electrólisis. Los algoritmos de aprendizaje automático permiten anticipar fallas, optimizar la operación bajo variabilidad renovable y reducir los costos operativos a través del ajuste dinámico y el mantenimiento proactivo (Girão et al., 2024). Los controladores PID tradicionales están siendo complementados con estrategias híbridas y adaptativas, incrementando su eficacia y flexibilidad para controlar variables críticas en tiempo real.

La expansión de sistemas SCADA y plataformas IoT facilita la supervisión remota, la adquisición masiva de datos y la coordinación de operaciones entre múltiples instalaciones. Esto posibilita la construcción de "gemelos digitales", herramientas de simulación y diagnóstico que maximizan la eficiencia y la seguridad del proceso (Nature Electronics, 2024; Mandal et al., 2025).

Finalmente, la integración de la electrólisis con sistemas renovables avanza, pero exige seguir perfeccionando la electrónica de potencia, los mecanismos de almacenamiento intermedio y las estrategias de gestión adaptativa del flujo energético, para sortear la intermitencia y favorecer la estabilidad de la red (Vivekananthan, 2024).

Contribuciones de Este Estudio al Campo de la Ingeniería Electrónica

Este estudio realiza una revisión sistemática y crítica del papel de la ingeniería electrónica en la modernización de la producción de hidrógeno por electrólisis. Ofrece un panorama actualizado sobre los avances en arquitectura electrónica, sensorización avanzada y

control adaptativo, presentando casos concretos y traduciendo hallazgos complejos a propuestas técnicas aplicables.

Además de compilar el estado actual de la tecnología, el documento contribuye al debate sobre retos industriales actuales como la dependencia de metales preciosos o la interoperabilidad y sugiere caminos de innovación en cuanto a materiales alternativos, algoritmos basados en IA, y protocolos de comunicación estandarizados. La perspectiva integra además las demandas de flexibilidad que surgen al acoplar la electrólisis con energías renovables y escenarios de demanda dinámica.

El texto genera también un espacio de reflexión para el futuro digital e inteligente del sector energético, destacando la centralidad de la electrónica en el desarrollo de plantas automatizadas, seguras y sostenibles. Este enfoque contribuye tanto al ámbito académico como al profesional, consolidando el papel de la electrónica como motor de la transición energética global (Springer, 2024; Girão et al., 2024; Nature Electronics, 2024; Vivekananthan, 2024).

Conclusiones

El estudio realizado permite afirmar que la ingeniería electrónica se encuentra en la base de los principales avances y de los desafíos técnicos que afronta la expansión de la electrólisis como tecnología central para la producción de hidrógeno verde. La evolución de los electrolizadores, sustentada en materiales avanzados y arquitectura electrónica eficiente, representa una respuesta concreta a la demanda mundial de soluciones bajas en carbono.

Sin embargo, la masificación industrial de la electrólisis todavía enfrenta retos multidimensionales: los costos de materiales nobles, la durabilidad limitada de componentes sometidos a operaciones exigentes, y la compatibilidad entre dispositivos y plataformas de diferentes fabricantes. Estos obstáculos requieren una estrategia colaborativa entre universidades, centros de innovación y la industria para la creación de materiales alternativos, catalizadores menos costosos, y sistemas electrónicos estandarizados, robustos e inteligentes.

Un aporte fundamental del campo electrónico radica en la sensorización avanzada y el monitoreo distribuido, que ha elevado de forma significativa la confiabilidad, seguridad operativa y eficiencia energética de las plantas de electrólisis. La proliferación de sensores digitales, el despliegue de IoT industrial y la integración con sistemas SCADA ya marcan una diferencia sustancial respecto a esquemas antiguos, habilitando nuevas formas de automatización, supervisión remota y mantenimiento predictivo.

Paralelamente, el futuro de la electrólisis a escala industrial depende de la rápida asimilación de algoritmos de inteligencia artificial y controladores adaptativos que permitan anticipar eventos críticos, ajustar la operación en tiempo real y optimizar el uso de recursos energéticos, aun en condiciones de alta variabilidad propia de las energías renovables.

La integración masiva de fuentes solares y eólicas con la electrólisis y el almacenamiento intermedio de hidrógeno será una de las piedras angulares en la descarbonización de industrias y sistemas energéticos. Solo mediante el aporte de soluciones electrónicas innovadoras será posible convertir a la electrólisis en una tecnología verdaderamente escalable, segura y económicamente viable.

Finalmente, se resalta que este trabajo no es solo una compilación del estado del arte, sino una invitación a impulsar el desarrollo de la electrónica energética y a fomentar la colaboración interdisciplinaria en la solución de los grandes retos de la transición energética. El futuro del hidrógeno verde es, en gran medida, el futuro de la ingeniería electrónica aplicada a la sociedad y al medioambiente.

Recomendaciones

A partir de los resultados y el análisis crítico realizado en torno a la electrólisis para la producción de hidrógeno verde desde la perspectiva de la ingeniería electrónica, se proponen las siguientes recomendaciones para profesionales, investigadores y responsables de la toma de decisiones en el sector energético, industrial y académico:

Fomentar la Investigación en Materiales Alternativos y Durables

El avance de los electrolizadores todavía está limitado por la dependencia de catalizadores basados en metales nobles, cuyo costo y escasez restringen la viabilidad económica a gran escala (Sun et al., 2025). Por ello, es prioritario impulsar proyectos de investigación y desarrollo enfocados en la síntesis y validación de materiales alternativos para electrodos y membranas, que ofrezcan buena actividad catalítica, alta durabilidad y bajo costo. Se recomienda la creación de alianzas internacionales entre institutos, empresas y universidades para acelerar la transferencia tecnológica y las pruebas en condiciones reales de operación.

Mejorar la Interoperabilidad y la Estandarización

Uno de los retos técnicos más significativos identificados es la dificultad para integrar sensores, controladores y sistemas electrónicos de diferentes fabricantes en una sola plataforma robusta y escalable (Girão et al., 2024). Se sugiere trabajar en la adopción de protocolos de comunicación abiertos y estandarizados (como OPC UA, MQTT, Modbus TCP/IP), así como participar en comités de normalización internacionales centrados en la industria del hidrógeno. Esto favorecerá la interoperabilidad, reducirá tiempos y costos de integración y mejorará la escalabilidad y seguridad de los sistemas industriales.

Invertir en Automatización Inteligente y Digitalización

Para maximizar el rendimiento y la seguridad operativa, es crucial apostar por la automatización inteligente a través de la integración de sistemas SCADA, IoT y algoritmos de inteligencia artificial en todos los niveles del proceso (Collina et al., 2025; Mandal et al., 2025). Se recomienda destinar recursos a la formación de profesionales especializados, la actualización constante de hardware y software industrial, y la incorporación de mantenimiento predictivo apoyado en big data y aprendizaje automático. Esta transformación digital debe contemplar tanto la digitalización de las plantas actuales como el diseño de nuevas infraestructuras adaptables y resilientes.

Promover el Desarrollo de Gemelos Digitales y Simulación Avanzada

Los llamados “gemelos digitales” modelos virtuales que reproducen en tiempo real el comportamiento físico de plantas y sistemas representan una oportunidad estratégica para la optimización operativa, diagnósticos remotos y la formación técnica avanzada (Nature Electronics, 2024). Se recomienda incentivar la inversión en plataformas de simulación que permitan el monitoreo en tiempo real, escenarios de estrés, simulación de fallos y evaluación de estrategias de mantenimiento, facilitando la toma de decisiones informadas y la reducción de riesgos.

Impulsar Políticas y Financiamiento Para la Integración Renovable

La electrólisis potenciada por energías renovables permite reducir la huella de carbono, mejorar la gestión de excedentes y favorecer el almacenamiento de energía a gran escala (Vivekananthan, 2024). Por ende, se debe promover la coordinación entre sectores público y privado para diseñar incentivos fiscales, líneas de financiamiento y marcos regulatorios que faciliten la instalación de plantas híbridas solar/eólica-hidrógeno, garantizando precios

competitivos y acceso a las redes eléctricas de manera justa y transparente.

Fortalecer la Formación Interdisciplinaria y la Transferencia Tecnológica

El avance de la electrólisis del agua como eje de una economía del hidrógeno requiere ingenieros electrónicos capaces de trabajar en equipos multidisciplinares y actualizarse frente a tecnologías emergentes (Springer, 2024). Se recomienda fortalecer los programas de formación universitaria y técnica, incorporar módulos curriculares de energías limpias, electrónica industrial, automatización y gestión de datos, y fomentar la participación de estudiantes en proyectos colaborativos con empresas y centros de investigación.

Potenciar la Seguridad, la Gestión de Riesgos y la Sostenibilidad

Dado que el hidrógeno es inflamable y presenta desafíos de almacenamiento y transporte, es indispensable diseñar, validar e implementar sistemas de protección electrónica, sensorización de seguridad y protocolos de respuesta ante fugas o fallos. Se recomienda adecuar las normativas locales a los estándares internacionales de seguridad, capacitar de forma continua al personal y establecer auditorías periódicas del estado del hardware y el software crítico (Collina et al., 2025).

La aplicación de estas recomendaciones requerirá no sólo inversión material, sino también una visión estratégica y colaborativa entre sectores, impulsando el rol proactivo de la ingeniería electrónica en la transición hacia sistemas energéticos más sostenibles, seguros y eficientes.

Referencias bibliográficas

- Angely Rossana Jaimes Rincon, M. A. (2023). *Evaluación teórica de la obtención del hidrógeno verde mediante la foto-electrocatalisis*. Obtenido de <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/d830e369-1eda-4d86-a95d-dfe3fb3e887f/content>
- Asociacion Española del Hidrogeno (AeH2). (2020). *Principales tecnologías de electrolisis*. Obtenido de <https://www.aeh2.org/tecnologia-hidrogeno/electrolisis/>
- Benavente, P. (2021). *El hidrógeno verde en Chile: una oportunidad de desarrollo territorial*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Santiago. Obtenido de https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/47272/1/S2100248_es.pdf
- Bhandari, R., Trudewind, C., & Zapp, P. (2014). Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis-A review[Evaluación del ciclo de vida de la producción de hidrógeno mediante electrólisis: una revisión]. *Journal of Cleaner Production*, 151-163. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.048>
- Brey, J. (2023). La electrólisis como una herramienta clave en la producción de hidrógeno verde. *Revista Economía Industrial*(424).
- Climatico, c. (23 de 03 de 2023). *Causas del cambio climático*. Obtenido de https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_es#:~:text=1890%20y%202010.-,Causas%20del%20aumento%20de%20las%20emisiones,ayudan%20a%20regular%20el%20clima.
- Collina, G. e. (2025). *Multi-stage monitoring of hydrogen systems for improved safety*. Obtenido

de International Journal of Hydrogen Energy / ScienceDirect:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319925001302>

David, N. (04 de 10 de 2024). *EL CONSUMO DE UN ELECTROLIZADOR*. Obtenido de

<https://eshidrogeno.com/consumo->

[electrolizador/#:~:text=En%20promedio%2C%20la%20eficiencia%20de,2%20kW%20de%20energ%C3%ADa%20el%C3%A9ctrica.](https://eshidrogeno.com/consumo-electrolizador/#:~:text=En%20promedio%2C%20la%20eficiencia%20de,2%20kW%20de%20energ%C3%ADa%20el%C3%A9ctrica.)

Diariomotor. (26 de 07 de 2010). Obtenido de Diariomotor:

<https://www.diariomotor.com/2010/07/26/el-primer-motor-de-combustion-interna-funcionaba-con-hidrogeno/>

EDP España. (14 de 10 de 2024). *EDP España*. Obtenido de Electrólisis: clave para el hidrógeno

verde y su futuro: <https://www.edpenergia.es/es/blog/sostenibilidad/electrolisis-hidrogeno-verde/>

Electronics, N. (21 de 4 de 2024). *Power electronics for green hydrogen generation with focus on electrolysis*. Obtenido de Nature Electronics / Nature:

<https://www.nature.com/articles/s41598-024-76191-6>

Enagás, S. (09 de 08 de 2024). Obtenido de Hidrogeno verde:claves para la transición

ecológica: <https://goodnewenergy.enagas.es/hidrogeno/hidrogeno-verde-transicion/>

Energy, U. D. (2025). *Technical Targets for Proton Exchange Membrane Electrolysis*. Obtenido

de U.S. Department of Energy: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/technical-targets-proton-exchange-membrane-electrolysis>

fabitroncoso. (s.f.). *proceso de electrolisis*. Recuperado el 05 de 07 de 2025, de Producción de hidrógeno por medio de electrolisis del agua:

<https://producciondehidrogenoporelectrolisis.wordpress.com/descripcion-electrolisis/>

- Fasihi, M., Bogdanov, D., & Breyer, C. (2016). Techno-Economic Assessment of Power-to-Liquis (PtL) Fuels Production and Global Trading Based on Hybrid PV-Wind Power Plants. *Energy Procedia*, 99, 243-268. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.115>
- Fastech. (18 de 08 de 2023). *Quien descubrio el hidrogeno*. Obtenido de https://www-fastechus.com.translate.goog/blog/who-discovered-hydrogen-a-timeline-of-hydrogen-technologies?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=sge&_x_tr_hist=true
- Fractal. (05 de 11 de 2024). Obtenido de La digitalizacion en la produccion de hidrogeno verde: <https://www.fractal.com/es/blog/digitalizacion-hidrogeno-verde>
- Fundacion Naturgy. (2021). El futuro del hidrogeno: situacion actual y prespectivas. (F. Naturgy, Ed.) Obtenido de <https://energetica21.com/images/ckfinder/files/LIBRO%20HIDROGENO%20Fundaci%C3%B3n%20Naturgy.pdf>
- Girao, A. C. (2024). *Recent progress in electrolyser control technologies for hydrogen energy production: A patent landscape analysis and technology updates*. Obtenido de Renewable and Sustainable Energy Reviews / ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X23021709>
- Good new energy. (09 de 04 de 2021). *para que utilizaremos el hidrogeno verde, la ya conocida como "energia del futuro"*. Obtenido de <https://goodnewenergy.enagas.es/innovadores/para-que-utilizaremos-el-hidrogeno-verde-la-ya-conocida-como-energia-del-futuro/>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. d. (2014). *Metodologia de la investigacion (6 ed)*. Mexico: McGraw-Hill Interamericana Editores S.A. de C.V..
- Hidrogeno, c. n. (s.f.). *QUÉ ES EL HIDRÓGENO*. Obtenido de <https://www.cnh2.es/el->

- para-su-almacenamiento-y-transporte-en-la-transición-hacia-una-economía-descarbonizada
- Kain, D. T. (27 de 03 de 2023). *Energía De Hidrógeno: Ventajas Y Desventajas*. Obtenido de <https://sigmaearth.com/es/Ventajas-y-desventajas-de-la-energ%C3%ADa-del-hidr%C3%B3geno/>
- Kumarage, G. Y. (2023). *Revolutionizing n-Type Co304 Nanowire for Hydrogen Gas Sensing*. Obtenido de Advance Energy Sustainability Research / Wiley Online Library: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aesr.202300451>
- Latam, G. (s.f.). Obtenido de Monitoreo de energía eléctrica: ¿ Que es y por qué es importante?: <https://blog.generaclatam.com/monitoreo-de-energia-electrica>
- Mandal, S. L. (1 de 3 de 2025). *A robust organic hydrogen sensor for distributed monitoring*. Obtenido de Nature Electronics / Nature: <https://www.nature.com/articles/s41928-025-01352-y>
- Mediavilla, M. (27 de 05 de 2022). *Rachel Carson, pionera y referente en la lucha contra el cambio climático*. Obtenido de <https://www.es.amnesty.org/en-que-estamos/blog/historia/articulo/rachel-carson-pionera-y-referente-en-la-lucha-contra-el-cambio-climatico/#:~:text=Rachel%20Carson%2C%20pionera%20y%20referente%20en%20la%20lucha%20contra%20el%20cambio%20clim%C3%A1tico>
- Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2022). *Electrolisis del agua*. (M. d. Colombia, Editor) Recuperado el 30 de 07 de 2025, de Ecosistema H2 Colombia: <https://www.minenergia.gov.co/es/ecosistema-hidrogeno-colombia/h2-en-colombia/cadena-de-valor/elctrolisis-agua/>
- Muñoz, A. (2022). *Hidrógeno verde: Ventajas e inconvenientes*. Obtenido de

<https://www.edpenergia.es/es/blog/sostenibilidad/hidrogeno-verde/>

Naturgy. (01 de 04 de 2025). *yoigoluzygas.com*. Obtenido de yoigoluzygas.com:

<https://www.yoigoluzygas.com/blog/papel-del-hidrogeno-verde-transicion-energetica/>

Parra , D., Valverde, L., Pino, F. J., & Patel, M. K. (2019). A review on the role, cost and value of hydrogen energy systems for deep decarbonisation [Una revisión sobre el papel, el coste y el valor de los sistemas de energía de hidrógeno para la descarbonización profunda]. *Renawable and Sustainable Energy Reviews*, *101*, 279-294.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.047>

Principia Ingenieros. (25 de Mayo de 2023). *Principia Ingenieros*. Obtenido de Hidrógeno: el combustible del futuro: <https://principia.es/hidrogeno/>

Reports, M. G. (1 de 1 de 2024). *Electrochemical Hydrogen Sensors Market Overview*. Obtenido de Market Growth Reports2024: <https://www.marketgrowthreports.com/market-reports/electrochemical-hydrogen-sensors-market-106195>

Repsol, S. (28 de Enero de 2025). Obtenido de Electrolisis: que es, como funciona y usos:

<https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/que-es-electrolisis/index.cshhtml>

Rosetta Technology. (s.f). Control de presion en electrolisis y elctrolizadores. Obtenido de

<https://rosetta-Technology.com/es/aula-tecnica/notas-de-aplicacion/control-presion-electrolizador>

Senza Hydrogen. (7 de Enero de 2025). Obtenido de Cómo elegir un electrolizador de hidrógeno adecuado: <https://senzahydrogen.com/es/choose-hydrogen-electrolyzer/>

Springer, Y. (24 de 4 de 2024). *Efficient solar-powered PEM electrolysis for sustainable hydrogen production*. Obtenido de Journal of materials Science / Springer:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s42247-024-00697-y>

Structuralia. (2 de 12 de 2024). *El impacto ambiental de los combustibles fosiles y el CO2*.

Obtenido de Blog Structuralia: https://blog-structuralia.com/impacto-ambiental-combustibles_fosiles

Sun, H. a. (14 de 1 de 2025). *Proton Exchance Membrane (PEM) Water Electrolysis: Cell-Level Innovations and Challenges*. Obtenido de Chemical Reviews / ACS Publications:

<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemrev.3c00904>

Transicion Energetica. (2024). *Los electrolizadores*. Obtenido de Los electrolizadores:

<https://www.transicionenergetica.es/vectores-energeticos/electrolizadores/>

Universidad politecnica de Madrid (UPM). (2023). *Suministro de energia electrica a electrolizadores:topologias mas empleadas*. Obtenido de

<https://blogs.upm.es/faraday/2023/11/04/suministro-de-energia-electrica-a-electrolizadores-topologias-mas-empleadas/>

Vivekananthan, M. (2024). *Seawater Electrolysis with Renawable Energy*. Obtenido de Cipher

Neutron Inc / LinkedIn: <https://www.linkedin.com/pulse/integrating-seawater-electrolysis-renewable-energy-7mfjc/>