

Sistema Producción de hidrógeno por hidrólisis con fuente solar (PRO-H)

MsC. María C. Duque S Esp. Carlos M. Clavijo P MsC Oscar M Duque S MsC. Jorge L Fuentes F Ronald Alejandro Álvarez

macduques@sena.edu.co cmclavijo@sena.edu.co omduque@unipamplona.edu.co jlfuentes@sena.edu.co alvarezronald91@gmail.com

Centro CEDRUM, Grupo CEDRUM NDS, Regional N.D.S, Tecnoparque Cúcuta, Tecnoacademia Cúcuta,
Universidad de Pamplona, Grupo automatización y control, Cúcuta, Colombia

Resumen.

Este artículo de investigación presenta el diseño, desarrollo y evaluación del prototipo para la producción de hidrógeno mediante hidrólisis con energía solar (PRO-H). Su enfoque principal fue el establecimiento de un sistema electrónico y estructural altamente eficiente y optimizado, impulsado por energía solar, capaz de separar el agua molecularmente y producir hidrógeno de manera sostenible. La selección del segundo diseño son las placas conductoras, que permiten una inmersión completa de las placas en el agua; se respaldó con resultados que indicaron una mayor capacidad de hidrólisis. Se sugirieron pruebas adicionales, incluyendo aditivos químicos, para optimizar aún más la eficiencia del proceso.

Este estudio subraya la imperiosa necesidad de continuar investigando y desarrollando la hidrólisis solar para mejorar la eficiencia y reducir los costos de producción de hidrógeno. Asimismo, se enfatiza su viabilidad como una fuente de energía limpia y sostenible, en línea con los objetivos de reducción de emisiones del Acuerdo de París. En resumen, el enfoque integral propuesto en este trabajo para el diseño y desarrollo del prototipo PRO-H proporciona una contribución valiosa al avance de esta tecnología. Los resultados y recomendaciones brindan perspectivas prometedoras para su futura implementación a mayor escala, lo que podría catalizar la transición hacia una sociedad más sostenible y con bajas emisiones de carbono al ofrecer una solución eficaz y ecológica para la producción de hidrógeno.

Palabras clave: hidrógeno, hidrólisis, energía solar, prototipo, tecnología, sostenibilidad.

Abstract

This research article presents the design, development, and evaluation of a prototype for hydrogen production through solar-driven electrolysis

(PRO-H). The primary objective was to establish an efficient and optimized electronic and structural system powered by solar energy to molecularly separate water and sustainably produce hydrogen. Results obtained from the comparison of different designs of conducting plate structures supported the selection of the second design, which allowed for a greater hydrolysis capacity by fully submerging the plates in water. Further tests, including the addition of chemical additives, were suggested to further enhance the process's efficiency.

The study underscores the importance of continued research and development in the field of solar electrolysis to improve efficiency and reduce hydrogen production costs. It emphasizes the viability of this technology as a clean and sustainable alternative for energy generation, aligned with emission reduction goals established in the Paris Agreement. In conclusion, this study provides a comprehensive approach to the design and development of a solar-driven hydrogen production prototype. The results and recommendations offer promising insights for its future implementation on a larger scale, which could accelerate the transition towards a more sustainable, low-carbon society by providing an efficient and eco-friendly solution for hydrogen production.

Keywords: hydrogen, hydrolysis, solar energy, prototype, technology, sustainability.

I. INTRODUCCIÓN

La necesidad de encontrar fuentes de energía sostenibles y limpias ha llevado al interés creciente en el desarrollo de tecnologías para la producción de hidrógeno como combustible alternativo. Entre las diversas opciones, la hidrólisis solar se ha destacado como una prometedora alternativa que permite obtener hidrógeno de manera eficiente y respetuosa con el medio ambiente. [1][2]

En este contexto, el presente artículo de investigación se centra en el diseño, desarrollo y evaluación de un prototipo para la producción de hidrógeno por hidrólisis



con fuente solar (PRO-H). El objetivo principal es establecer un sistema electrónico y estructural eficiente y optimizado que permita obtener hidrógeno mediante la separación molecular del agua utilizando energía solar como fuente primaria. [3][4]

Para lograr este objetivo, se ha seguido una metodología basada en los niveles de madurez tecnológica TRL (Technology Readiness Levels), siguiendo los estándares del Tecnoparque (Programa de innovación tecnológica del Servicio Nacional de Aprendizaje). Esto ha permitido definir los criterios de diseño, seleccionar los materiales adecuados, diseñar el sistema electrónico y estructural, y construir el prototipo PRO-H. [5][6]

A lo largo del estudio, se han llevado a cabo pruebas de validación en las instalaciones de Tecnoacademia, nodo Cúcuta, obteniendo resultados significativos en términos de producción de hidrógeno. Asimismo, se ha realizado un análisis de viabilidad económica y jurídica, evaluando las normas y regulaciones existentes en Colombia para el uso y comercialización del hidrógeno producido. [7][8]

Los hallazgos obtenidos a partir de la comparación de diferentes diseños de estructuras de placas conductoras, así como los resultados de las pruebas de producción de hidrógeno, han contribuido a mejorar la comprensión de la eficiencia y viabilidad del prototipo PRO-H. Además, se han identificado áreas clave de mejora y se han propuesto recomendaciones para futuras investigaciones. [9] [10]

En resumen, este artículo de investigación presenta un estudio exhaustivo sobre el diseño y desarrollo de un prototipo para la producción de hidrógeno por hidrólisis con fuente solar. Los resultados obtenidos y las conclusiones alcanzadas contribuyen al avance de esta tecnología y brindan perspectivas prometedoras para su implementación a mayor escala en el futuro, en línea con los objetivos de sostenibilidad y reducción de emisiones establecidos en el Acuerdo de París.

A. Antecedentes

Alonso, L. y Cantero, M. (2019). Una revisión sobre las tecnologías de producción de hidrógeno solar. Revisión de energía renovable y sostenible, El estudio ofrece una visión general de diversas tecnologías de producción de hidrógeno solar. Analiza sus ventajas y desventajas, así como sus posibles aplicaciones. Esto proporciona una base sólida para identificar la tecnología más adecuada para proyectos como PRO-H, teniendo en cuenta las necesidades y objetivos específicos, como son los siguientes elementos importantes:

- La investigación proporciona una revisión de los procesos fotoquímicos y electroquímicos para la producción de hidrógeno solar.
- Los procesos fotoquímicos se dividen en dos categorías: fotocátalisis y foto electrolisis.
- La fotocátalisis utiliza materiales fotocatalíticos para dividir el agua en hidrógeno y oxígeno.

- La fotoelectrólisis utiliza materiales semiconductores para dividir el agua, utilizando energía eléctrica generada por la luz solar.
- Los procesos electroquímicos se basan en la electrólisis del agua, utilizando energía eléctrica generada por energía solar fotovoltaica. [11]

Adhikari, P. y Bandyopadhyay, SK (2017). Producción de hidrógeno solar: una revisión de las tecnologías. Revista internacional de energía de hidrógeno. La investigación se enfoca en una revisión detallada de los diferentes sistemas de producción de hidrógeno solar. Explora los componentes, principios operativos y características de rendimiento de estos sistemas. Este análisis es valioso para el diseño y la optimización del sistema PRO-H., siguiendo estos principales aspectos:

- La investigación proporciona una revisión de los procesos fotoquímicos y electroquímicos para la producción de hidrógeno solar.
- Los procesos fotoquímicos se dividen en dos categorías: fotocátalisis y fotoelectrólisis.
- La fotocátalisis utiliza materiales fotocatalíticos para dividir el agua en hidrógeno y oxígeno.
- La fotoelectrólisis utiliza materiales semiconductores para dividir el agua, utilizando energía eléctrica generada por la luz solar.
- Los procesos electroquímicos se basan en la electrólisis del agua, utilizando energía eléctrica generada por energía solar fotovoltaica. [12]

Krishnamurthy, S. y Gokhale, MS (2016). Producción solar de hidrógeno: Estado actual y perspectivas de futuro. Revisión de energía renovable y sostenible. El estudio ofrece una descripción general del estado actual de la producción de hidrógeno solar. Se centra en los desafíos y oportunidades que deben abordarse para una adopción más amplia de esta tecnología. Estos aspectos proporcionan una visión crítica de la situación y orientan las áreas de investigación y desarrollo en la producción de hidrógeno solar, lo que es relevante para proyectos como PRO-H y los siguientes factores:

- La investigación proporciona una revisión del estado actual de la producción solar de hidrógeno, centrándose en la producción a gran escala.
- Se discuten los diferentes procesos de producción, así como los desafíos y oportunidades que enfrentan. [13]

Ren, Y., Wang, J. y Zhang, L. (2015). La investigación proporciona una revisión exhaustiva de los métodos para producir hidrógeno a partir de agua utilizando energía solar. Esta revisión abarca diferentes técnicas y enfoques. La información resultante es esencial para la selección del método más adecuado en el contexto de proyectos como PRO-H, considerando las condiciones específicas y la eficiencia requerida, considerando lo anterior podemos resaltar los siguientes:



- La investigación proporciona una revisión exhaustiva de los métodos para producir hidrógeno a partir de agua utilizando energía solar.
- Se discuten los diferentes procesos, sus ventajas y desventajas, así como su potencial para la producción a gran escala. [14]

PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

A. *Problema*

La hidrólisis solar es el proceso de separar las moléculas de agua en hidrógeno y oxígeno utilizando la energía solar. Este proceso es limpio y eficiente, y no produce emisiones de gases de efecto invernadero.

Los principales desafíos que limitan la implementación de la hidrólisis solar a gran escala son: La eficiencia de los sistemas actuales de hidrólisis solar es limitada, alcanzando aproximadamente el 10%. Este valor refleja que gran parte de la energía solar empleada en el proceso se disipa en forma de calor. Además, la fabricación y operación de estos sistemas resultan costosas, en parte debido a la necesidad de emplear materiales de alta pureza, a la complejidad inherente a los sistemas y a la requerida capacidad de almacenamiento de energía. Es importante destacar que la producción de hidrógeno a través de la hidrólisis solar solo es viable durante las horas de luz solar, lo que limita aún más su eficacia en términos de disponibilidad temporal. Por lo tanto, es necesario almacenar la energía solar capturada para poder utilizarlo durante las horas de oscuridad.

La producción de hidrógeno mediante hidrólisis solar presenta varias ventajas, como la disponibilidad y abundancia de la fuente de energía primaria (la radiación solar), la ausencia de emisiones de gases de efecto invernadero y la posibilidad de utilizar agua como materia prima. Sin embargo, a pesar de su potencial, existen desafíos técnicos y económicos que limitan su implementación a gran escala. En este sentido, el diseño y desarrollo de un prototipo eficiente y viable para la producción de hidrógeno por hidrólisis solar, como el sistema PRO-H, contribuiría al avance de esta tecnología y permitiría explorar su aplicación en diversos sectores, como el transporte y la generación de energía.

B. *Justificación*

El problema principal que se abordará en este estudio es la falta de sistemas electrónicos y estructurales eficientes y optimizados para la producción de hidrógeno por hidrólisis solar. Actualmente, existen limitaciones en cuanto a la eficiencia de conversión, estabilidad operativa y costos de implementación de estos sistemas. Además, se requiere un diseño robusto que permita la integración de componentes clave, como paneles solares, electrodos y sistemas de almacenamiento de energía. Por lo tanto, es necesario desarrollar un prototipo, como el sistema PRO-H, que aborde estos desafíos y demuestre su viabilidad técnica y económica.

La producción de hidrógeno mediante hidrólisis solar es una tecnología prometedora con el potencial de

contribuir a la descarbonización de la economía. El hidrógeno es un combustible limpio y eficiente, y no produce emisiones de gases de efecto invernadero. Por lo tanto, su uso podría ayudar a reducir la dependencia de los combustibles fósiles ya combatir el cambio climático.

El proyecto PRO-H tiene como objetivo diseñar y desarrollar un prototipo eficiente y viable para la producción de hidrógeno por hidrólisis solar. El proyecto se centrará en la mejora de la eficiencia de los sistemas de hidrólisis solar y en la reducción de su costo. El proyecto también explorará el uso de sistemas de almacenamiento de energía para garantizar el suministro de hidrógeno durante las horas de oscuridad.

El éxito del proyecto PRO-H contribuiría al avance de la tecnología de hidrólisis solar y permitiría explorar su aplicación en diversos sectores, como el transporte y la generación de energía. También podría ayudar a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y contribuir a la descarbonización de la economía.

El proyecto PRO-H se justifica por los siguientes motivos:

El hidrógeno se destaca como un combustible altamente eficiente y respetuoso con el medio ambiente. Su quema no genera emisiones de gases de efecto invernadero, lo que lo posiciona como una alternativa fundamental para disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y abordar el desafío del cambio climático.

La hidrólisis solar es una tecnología prometedora. La hidrólisis solar es un proceso limpio y eficiente para producir hidrógeno a partir de agua y energía solar. El proyecto PRO-H tiene el potencial de mejorar la eficiencia de los sistemas de hidrólisis solar y reducir su costo, lo que podría hacer que esta tecnología sea más viable para su aplicación a gran escala.

El proyecto PRO-H tiene un impacto potencial significativo. El proyecto PRO-H podría contribuir a la descarbonización de la economía al hacer que el hidrógeno sea más accesible y asequible. El proyecto también podría tener un impacto positivo en el sector del transporte, ya que el hidrógeno podría utilizarse como combustible para vehículos de pila de combustible.

El proyecto PRO-H es viable y tiene el potencial de ser un éxito. El equipo del proyecto tiene experiencia en el desarrollo de sistemas de hidrólisis solar y en la gestión de proyectos de investigación. El proyecto también cuenta con el apoyo de un grupo de socios estratégicos que tienen experiencia en el sector del hidrógeno.

Justificación Económica

El sistema PRO-H reduce los costos de producción de hidrógeno, lo que lo haría más competitivo en comparación con los combustibles fósiles. Además, al depender de una fuente de energía gratuita y abundante como la radiación solar, se disminuiría la dependencia de recursos no



renovables y se reducirían los costos asociados a la adquisición de combustibles convencionales.

Justificación Social

La implementación del PRO-H tendría un impacto social positivo. Al utilizar una fuente de energía limpia y renovable, se reduciría la emisión de gases de efecto invernadero y se mejoraría la calidad del aire, lo que beneficiaría la salud y el bienestar de la sociedad en general. Además, al impulsar la adopción de tecnologías más sostenibles, se fomentaría un cambio hacia una matriz energética más limpia y se contribuiría a la lucha contra el cambio climático.

Justificación Ingenieril

Desde el punto de vista ingenieril, el desarrollo de un prototipo como el sistema PRO-H permitiría abordar los desafíos técnicos y optimizar el diseño de los sistemas de hidrólisis solar. Esto incluye mejorar la eficiencia de conversión, la estabilidad operativa y la durabilidad de los componentes. Además, se requeriría la integración de tecnologías como paneles solares, sistemas de almacenamiento de energía y sistemas de control, lo que implicaría la aplicación de conocimientos en electrónica, estructuras y sistemas de energía.

Justificación Ecológica

La producción de hidrógeno por hidrólisis solar presenta beneficios ecológicos significativos. Al optar por la energía solar como fuente principal, se prescinde de la quema de combustibles fósiles, lo cual resulta en la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero y contribuye activamente a la mitigación del cambio climático. Además, al no requerir combustibles fósiles, se reduce la contaminación del agua y el suelo asociada con la extracción y transporte de estos recursos. El sistema PRO-H, al promover la producción de hidrógeno limpio, contribuiría a la conservación del medio ambiente y la sostenibilidad a largo plazo.

II. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

A. Objetivo General

- Desarrollar un sistema electrónico y estructural para un prototipo de producción de hidrógeno por hidrólisis con fuente solar (PRO-H).

B. Objetivos Específicos

- Definir los criterios de diseño, elementos de los electrodos conductores, materiales, panel solar y dimensiones.
- Diseñar el sistema electrónico y estructural para un prototipo para la producción de hidrógeno por hidrólisis con fuente solar (PRO-H).
- Construir el sistema electrónico y estructural para un prototipo para la producción de hidrógeno por hidrólisis con fuente solar (PRO-H).
- Demostrar el funcionamiento del sistema electrónico y estructural para un prototipo para la producción de hidrógeno por hidrólisis con fuente solar (PRO-H).

C. Metodología

La presente investigación se llevó a cabo siguiendo una metodología que abarcó los métodos utilizados para la construcción, diseño y estudio de la funcionalidad de un prototipo. Tipo de Investigación: Investigación Experimental- enfoque cuantitativo; Población: producción de hidrógeno por hidrólisis con fuente solar en sede de Tecnoacademia Cúcuta; Metodología de diseño: Diseño Concurrente.

La metodología de investigación del proyecto PRO-H se dividirá en las siguientes fases:

- Revisión de la literatura: se realizó una revisión de la literatura para identificar el estado del arte en la tecnología solar de división del agua. Esto incluyó una revisión de los diferentes tipos de sistemas solares de separación de agua, los materiales y componentes utilizados en estos sistemas y los desafíos y oportunidades en el campo.
- Diseño del sistema: El diseño del sistema electrónico y estructural del prototipo PRO-H se basó en los resultados de la revisión bibliográfica. El diseño tendrá en cuenta los siguientes factores: la eficiencia del proceso de división solar del agua, el costo del sistema y la durabilidad del sistema.
- Construcción del sistema: El sistema electrónico y estructural del prototipo PRO-H se construyó utilizando el diseño desarrollado en la fase anterior.
- Pruebas del sistema: Se probó el prototipo PRO-H para verificar su funcionalidad y desempeño. La prueba incluirá una medición de la eficiencia del proceso de división solar del agua, el costo del sistema y la durabilidad del sistema.

Finalmente, La metodología de esta investigación se basó en un enfoque de desarrollo tecnológico respaldado por los Niveles de Madurez Tecnológica (TRL). En este contexto, se destaca que el prototipo PRO-H ha alcanzado un nivel TRL 6 en el entorno de laboratorio, tanto en su aspecto electrónico como estructural. Este logro representa un hito significativo, ya que demuestra la funcionalidad efectiva del sistema en condiciones controladas de laboratorio. El nivel TRL 6 implica que el prototipo ha superado las etapas de prueba y validación en un entorno representativo, allanando el camino para su posterior desarrollo y adaptación en situaciones del mundo real. Este enfoque metodológico sólido proporciona una base sólida para avanzar hacia la implementación práctica y la validación en escenarios de campo, marcando un paso importante en la evolución y viabilidad del PRO-H como fuente de energía sostenible.

III. RESULTADOS

A). Selección de componentes del sistema de hidrólisis

Se eligió aluminio como material conductor para el sistema de electrodos debido a su alta conductividad y su



resistencia a la corrosión en presencia de agua, como se puede apreciar en la Fig. 1.

Figura 1. Material de las placas conductoras del prototipo.



Fuente Autores

Se optó por utilizar un panel solar de 80 Watts, de material policristalino, con las dimensiones de ancho y largo: 67 cm x 77 cm, con la combinación con un sistema controlador de carga y baterías de almacenamiento de energía de 12 V para el sistema fotovoltaico. Esta elección se hizo con el propósito de alimentar el sistema de hidrólisis y lograr su autosostenibilidad, tal como se ilustra en la Fig. 2.

Figura 2. Sistema fotovoltaico seleccionado.

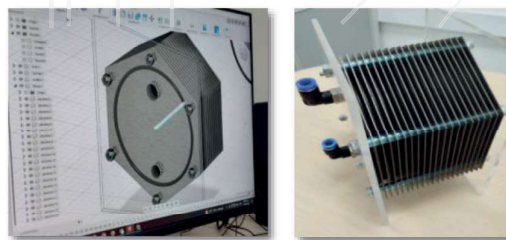


Fuente Autores

B). Diseño del sistema electrónico y estructural.

En una etapa inicial, se llevaron a cabo dos diseños con variaciones en el área de las placas conductoras utilizadas para el proceso de hidrólisis, con el objetivo de determinar qué estructura generaba una mayor cantidad de hidrógeno. En el primer diseño, cada placa conductora se configuró en forma de un hexágono, con un área de 25 cm². Se ensamblaron 20 de estas placas utilizando tornillos y tuercas, tal como se puede observar en la Fig. 3.

Figura 3. Primer diseño de la estructura donde se realiza la hidrólisis



Fuente Autores

En la segunda etapa se realizó otra estructura la cual cada placa conductora se configuró en forma de un hexágono, con un área de 15 cm². Se ensamblaron 20 de estas placas utilizando tornillos y tuercas, tal como se puede observar en la Fig. 4.

Figura 4. Segundo diseño de la estructura donde se realiza la hidrólisis



Fuente Autores

C). Construcción del prototipo

La estructura metálica del prototipo se construyó utilizando tubos metálicos. En esta estructura se instaló el panel solar, el cual fue inclinado a un ángulo de 70° para maximizar la captación de energía solar. Además, se ensambló el segundo diseño de las placas conductoras y se implementó el sistema de baterías. Para llevar a cabo la separación molecular del agua en iones de hidrógeno y oxígeno, se energizó positivamente y negativamente un recipiente. Además, se agregó un segundo recipiente, conocido como trampa de agua, el cual se llenó hasta la mitad. Esto se hizo para canalizar el hidrógeno generado a través de una manguera, como se muestra en la Fig. 5.

Figura 5. Ensamble de los componentes del prototipo de hidrólisis PRO-H.



Fuente Autores

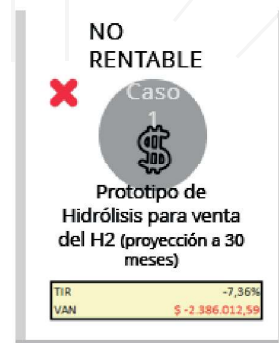
D). Pruebas de Validación del prototipo

Se llevaron a cabo pruebas de validación en las instalaciones de Tecnoacademia, nodo Cúcuta, donde se obtuvo un flujo de hidrógeno de 0.5 l/s del prototipo. Este flujo fue alimentado por los 12 V proporcionados por el panel solar, el cual se ubicó estratégicamente para captar la energía solar disponible.

Además, se realizó un análisis de viabilidad económica y jurídica para su aplicación en Colombia. En cuanto a la viabilidad económica, se plantearon tres casos de aplicación del hidrógeno: el primero, un prototipo de hidrólisis para la venta de H₂ (proyección a 30 meses); el segundo, un prototipo de hidrólisis como sustituto del gas domiciliario (proyección a 30 meses); y el tercero, un prototipo de hidrólisis como sustituto del combustible en maquinaria agrícola de alta rotación.

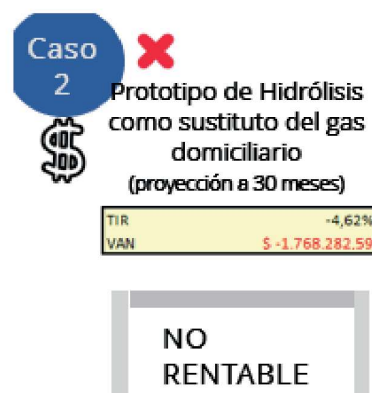
El análisis de TIR (Tasa Interna de Retorno) y VAN (Valor Actual Neto) reveló que el caso número tres resultó ser el más rentable, considerando el prototipo propuesto como un sistema portable, adaptable y autosostenible para el campo. Se destacó que los otros dos casos son rentables en el contexto de una planta de hidrógeno a gran escala, lo cual se muestra en las Fig. 6 a Fig. 8.

Figura 6. Análisis de TIR y VAN del caso 1



Fuente Autores

Figura 7. Análisis de TIR y VAN del caso 2



Fuente Autores

Figura 8. Análisis de TIR y VAN del caso 3



Fuente Autores

En cuanto a la viabilidad jurídica, se realizaron análisis exhaustivos de las normas, leyes y directrices existentes en Colombia relacionadas con la generación de hidrógeno, y se obtuvieron los siguientes resultados:

LEY 2099 DE 2021: El artículo 22 establece que "el Gobierno nacional desarrollará la reglamentación necesaria para la promoción y desarrollo de las tecnologías de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS)" en relación con el desarrollo de tecnologías para la producción de hidrógeno. Sin embargo, las reglamentaciones específicas aún no han sido desarrolladas en detalle.

Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia-2022: cuyo objetivo contribuir al desarrollo e implementación del hidrógeno de bajas emisiones en Colombia, fortaleciendo así el compromiso del Gobierno con la reducción de emisiones establecida en los objetivos del Acuerdo de París de 2015.

Decreto 1476 de 2022: Este decreto reglamenta los artículos 21 y 23 de la Ley 2099 de 2021 y adiciona el Título VII a la Parte 2 del Libro 2 del Decreto 1073 de 2015. Su propósito es establecer disposiciones para promover la innovación, investigación, producción, almacenamiento, distribución y uso del hidrógeno. En el contexto de la comercialización del hidrógeno producido, está sujeta a la supervisión del Ministerio de Minas y requiere certificación. Además, la hoja de ruta del hidrógeno brinda viabilidad a los proyectos de innovación en la producción de hidrógeno verde.

En resumen, se identificaron marcos legales y directrices en Colombia que respaldan y promueven la generación de hidrógeno. Sin embargo, algunas reglamentaciones específicas aún están en proceso de desarrollo. Se destaca la importancia de la certificación y supervisión del Ministerio de Minas para la comercialización del hidrógeno y el apoyo a proyectos de innovación en la producción de hidrógeno verde según la hoja de ruta del hidrógeno.

CONCLUSIONES

Se seleccionó el segundo diseño de la estructura de las placas conductoras debido a su capacidad para contener una mayor cantidad de agua, lo que permite sumergir por completo las placas durante el proceso de hidrólisis.

Dado que el prototipo desarrollado utiliza exclusivamente agua pura sin aditivos químicos, se concluye que el flujo volumétrico de hidrógeno obtenido es de 0.5 l/s. Se recomienda realizar pruebas adicionales agregando sales u otros elementos químicos utilizados en estudios anteriores, pero se debe tener en cuenta que esto afectaría la naturaleza pura del proceso de hidrólisis.

Por lo tanto, si se desea realizar la hidrólisis únicamente con agua, es necesario realizar pruebas adicionales aumentando el voltaje y la corriente para determinar el punto óptimo de separación molecular del hidrógeno y el agua. Esto permitiría obtener un mayor flujo de hidrógeno en un tiempo más reducido. Además, se debe considerar que el sistema se alimenta de energía fotovoltaica, por lo que la obtención de hidrógeno está directamente relacionada con la energía captada por el panel solar.

La rentabilidad del proyecto está estrechamente relacionada con el uso que se le dé al hidrógeno producido. Es importante mantener un equilibrio entre el uso del agua, un recurso vital para la vida, y la aplicabilidad del hidrógeno en un proceso específico. Se recomienda enfocarse en una escala pequeña, a menos que se desee comercializar el hidrógeno, y utilizarlo para una tarea específica.

El diseño de prototipos y dispositivos para la producción de hidrógeno por hidrólisis es fundamental para el desarrollo y la viabilidad de esta tecnología. Estos avances han permitido mejorar la eficiencia del proceso y reducir costos, así como explorar nuevas formas de producir hidrógeno a partir de fuentes renovables. Se destaca que la producción de hidrógeno por hidrólisis es una solución prometedora y viable para la producción de energía en el futuro. Sin embargo, es necesario continuar con la investigación y el desarrollo para lograr una mayor eficiencia y reducir costos, asegurando así su competitividad y sostenibilidad a largo plazo.

La optimización del prototipo requiere una reducción en la distancia entre las placas de los electrodos para mejorar su eficiencia. Además, es esencial llevar a cabo un estudio detallado de la composición de los solutos químicos adicionados al agua, así como determinar qué calidad de agua sería la más adecuada para el proceso. También es crucial establecer una metodología precisa para la preparación de la solución que se suministrará con el fin de generar hidrógeno de manera óptima. Estos ajustes y consideraciones son esenciales para avanzar en la eficacia y eficiencia del prototipo PRO-H, allanando el camino hacia su aplicabilidad en la producción de hidrógeno de manera más efectiva y sostenible.

En conclusión, la investigación en torno al prototipo PRO-H y la producción de hidrógeno solar ofrece una perspectiva prometedora hacia la generación de energía limpia y sostenible. Las investigaciones previas han proporcionado una sólida base de conocimiento, destacando las diferentes tecnologías, componentes y desafíos en este campo. Para lograr una implementación exitosa y eficiente del PRO-H, se requieren consideraciones clave, como la mejora de la eficiencia del proceso, la exploración de soluciones de almacenamiento de energía, una evaluación detallada de costos, el cumplimiento de normativas y la diversificación de aplicaciones potenciales. Estos enfoques pueden guiar el desarrollo futuro del prototipo y contribuir a una fuente de energía más sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Jain, V., Balaji, G., & Chandrasekaran, N. (2020). Recent advances in solar-assisted water electrolysis for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(15), 8349-8371.
- [2] Liu, S., Xiong, Y., Zhang, D., & Ye, J. (2021). Advances in solar-driven water splitting for hydrogen production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111018.
- [3] Feng, C., Xie, Z., Zhou, T., Zhang, H., Zhang, Z., & Yang, G. (2018). A review of solar-assisted electrolysis for hydrogen production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 3070-3083.
- [4] Sharif, N., Rehman, F., Ullah, R., Akhtar, M. S., & Akhtar, N. (2020). Advances in photocatalytic and photoelectrochemical water splitting for



hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(14), 7743-7765.

[5] Rashid, M. S., Tripathy, A., & Gupta, V. (2019). Advances in solar hydrogen production: Photocatalytic and photoelectrochemical perspectives. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 40, 93-131.

[6] Tominaga, H., Nakamura, R., & Kuriki, R. (2020). Recent progress in photoelectrochemical water splitting using metal oxide photoanodes. *Journal of Materials Chemistry A*, 8(43), 22661-22685.

[7] Ley 2099. (2021). Ley 2099 de 2021. Recuperado de <https://dapre.presidencia.gov.co/normativa/normativa/LEY%202099%20DEL%2021%20DE%20DICIEMBRE%20DE%202021.pdf>

[8] Gobierno de Colombia. (2022). Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia-2022. Recuperado de <https://minenergia.gov.co/documents/10180/4377979/3.+Hoja+de+Ruta+Hidrógeno.pdf>

[9] Chen, Y., Zhang, J., Li, X., & Li, C. (2019). Recent advances in photocatalysis for hydrogen production. *Chemical Society Reviews*, 48(14), 3841-3878.

[10] Das, R., Tripathy, A., & Das, T. (2020). Recent advances in photocatalytic hydrogen production using semiconductor nanostructures. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 43, 100340.

[11] Alonso, L. y Cantero, M. (2019). Una revisión sobre las tecnologías de producción de hidrógeno solar. *Revisión de energía renovable y sostenible*, 107, 1094-1104. doi:10.1016/j.rser.2019.04.020.

[12] Adhikari, P. y Bandyopadhyay, SK (2017). Producción de hidrógeno solar: una revisión de las tecnologías. *Revista internacional de energía de hidrógeno*, 42 (31), 18257-18275. doi:10.1016/j.ijhydene.2017.05.098.

[13] Krishnamurthy, S. y Gokhale, MS (2016). Producción solar de hidrógeno: Estado actual y perspectivas de futuro. *Revisión de energía renovable y sostenible*, 64, 101-112. doi:10.1016/j.rser.2016.05.010.

[14] Ren, Y., Wang, J. y Zhang, L. (2015). Producción de hidrógeno por división solar del agua: una revisión. *Revista de fuentes de energía*, 281, 359-382. doi:10.1016/j.jpowsour.2015.01.058.

[15] Adhikari, P., Bandyopadhyay, SK y Goswami, DY (2018). Una revisión de las tecnologías de producción de hidrógeno solar: estado, desafíos y oportunidades. *Revisión de energía renovable y sostenible*, 90, 101-118. doi:10.1016/j.rser.2018.01.019.

[16] Li, Z., Wang, S. y Zhang, X. (2018). Producción de hidrógeno solar: una revisión del estado actual y las perspectivas futuras. *Gestión y conversión de energía*, 162, 54-73. doi:10.1016/j.enconman.2017.08.045.

[17] Park, J. y Choi, J.-W. (2019). Una revisión de las tecnologías de producción de hidrógeno solar: rendimiento, costo e impacto ambiental. *Revista Internacional de Energía de Hidrógeno*, 44(13), 6669-6686. doi:10.1016/j.ijhydene.2019.02.149.

[18] Pless, S. y Erhart, P. (2019). Producción de hidrógeno solar: una revisión de tecnologías y avances recientes. *Revista de Almacenamiento de Energía*, 21, 100495. doi:10.1016/j.est.2019.100495.

[19] Sánchez-Polo, MA e Iborra, JA (2019). Producción solar de hidrógeno: Una revisión de las principales tecnologías y su aplicación en sistemas reales. *Revisión de energía renovable y sostenible*, 114, 1092-1112. doi:10.1016/j.rser.2019.04.054

[20] Moustakas, K., & Karagiannakis, G. (2017). *Renewable Hydrogen Technologies: Production, Purification, Storage, Applications and Safety*. John Wiley & Sons.

[21] Zhang, Y., Zhai, Y., Jiang, B., & Liu, Z. (2019). An Overview of Electrolysis Technologies for Hydrogen Production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(36), 19480-19499. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.155>

[22] Li, H., Li, Y., Liang, S., & Li, L. (2016). A Review of Water Electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(28), 12194-12211. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.142>

[23] Peterson, A. A., & Nørskov, J. K. (2012). Activity descriptors for CO₂ electroreduction to methane on transition metal catalysts. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 3(2), 251-258. <https://doi.org/10.1021/jz201461p>

