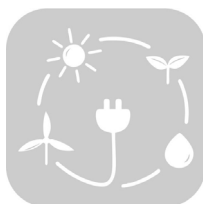


Exploración de tecnologías para la generación de hidrógeno verde: desde energías renovables hasta los electrolizadores más utilizados

RESUMEN: Esta investigación teórica aborda la posibilidad de generar hidrógeno verde por medio de la electrólisis del agua, con la energía solar fotovoltaica como principal fuente eléctrica. Considerando la abundancia y el gran potencial energético del hidrógeno, este podría ser una excelente alternativa de energía limpia. No obstante, los métodos convencionales de producción, como el reformado de gas natural con vapor, tienen una alta huella de carbono, emitiendo cantidades significativas de CO₂ que comprometen las ventajas ambientales del hidrógeno. Nuestros hallazgos indican que la electrólisis alimentada por energía solar no solo podría disminuir drásticamente las emisiones de CO₂ vinculadas a la obtención de hidrógeno, sino también contribuir a los Objetivos de Desarrollo Sostenible y a la lucha contra el cambio climático a nivel global. Adicionalmente, la reducción de los costos asociados a la tecnología fotovoltaica potencia la factibilidad económica de esta alternativa. Se examinan los beneficios de los electrolizadores sin membrana, cuyas ventajas incluyen la disminución de los gastos operacionales y una mayor resistencia a las impurezas. A pesar de enfrentar algunos retos técnicos, estos desarrollos marcan un avance hacia una producción de hidrógeno más eficaz y ecológica, posicionándolo como una fuente de energía futura prometedora.

PALABRAS CLAVE: Hidrógeno verde, electrólisis, energía fotovoltaica, sostenibilidad ambiental, tecnología electrolizadores.



Colaboración

Juan Antonio Pinilla-Rodríguez, Universidad Cristóbal Colón; Felipe de Jesús Pozos-Texon, María Monserrath Tijerino-Torres, Tecnológico Nacional de México campus Veracruz; Carlos Javier Gasca-Caballero; Claudia Reyes-Olán, Universidad Cristóbal Colón

Fecha de recepción: 08 de abril de 2024

Fecha de aceptación: 03 de junio de 2024

ABSTRACT: This theoretical research addresses the possibility of generating green hydrogen by water electrolysis, with solar photovoltaic energy as the main electrical source. Considering the abundance and great energy potential of hydrogen, it could be an excellent clean energy alternative. However, conventional production methods, such as steam reforming of natural gas, have a high carbon footprint, emitting significant amounts of CO₂ that compromise the environmental advantages of hydrogen. Our findings indicate that solar-powered electrolysis could not only drastically decrease the CO₂ emissions linked to obtaining hydrogen, but also contribute to the Sustainable Development Goals and the fight against global climate change. In addition, the reduction of costs associated with photovoltaic technology enhances the economic feasibility of this alternative. The benefits of membrane-free electrolyzers, whose advantages include lower operational costs and greater resistance to impurities, are discussed. Despite facing some technical challenges, these developments mark a move towards more efficient and environmentally friendly hydrogen production, positioning it as a promising future energy source.

KEYWORDS: Green hydrogen, electrolysis, photovoltaics, environmental sustainability, electrolyzer technology.

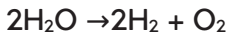
INTRODUCCIÓN

El elemento predominante en la Tierra es el hidrógeno y aún no se utiliza como combustible primario, debido a que no se encuentra de manera aislada, sino que siempre está enlazado a otros elementos, concretamente en los hidrocarburos y al agua. Sin embargo, la ventaja de producir hidrógeno a partir de una variedad de fuentes de energía es que se puede hacer de diversas maneras [1], incluyendo

el cambio de agua-gas [2], la electrólisis del agua [3], el reformado con vapor a través de gas natural, división termoquímica del agua, reformado con vapor, gasificación de carbón, gasificación de biomasa, entre otros [4].

Actualmente, el 95% de la producción mundial de hidrógeno se cubre mediante el proceso de reformado con vapor de gas natural, debido a que es el método más rentable para generar hidrógeno. Sin embargo, por cada kilogramo de hidrógeno molecular (H₂) generado con este método, se liberan 10 kg de CO₂ [5].

Hoy en día el hidrógeno es el elemento más abundante en la tierra y su capacidad energética es tres veces mayor que la de los hidrocarburos; el hidrógeno puede generar aproximadamente 39.4 kWh/Kg durante su combustión [6]; tiene la gran ventaja de liberar sólo agua en el proceso de combustión [7] y puede aplicarse en la mayoría de las actividades en donde se utiliza combustibles fósiles [8]. Una de los métodos para generar hidrógeno molecular es mediante el proceso de electrólisis, el cual, consiste en hacer pasar electricidad a través de dos electrodos en agua. La molécula de agua se divide y produce gas oxígeno en el ánodo y gas hidrógeno en el cátodo mediante la siguiente reacción:



En este sentido, el hidrógeno es el energético más eficiente y abundante que se podría obtener, pero la forma electrolítica necesita energía eléctrica y una forma de obtenerla de manera eficiente es a través de la energía solar fotovoltaica, resultado una alternativa económica y amigable con el medio ambiente. La energía solar fotovoltaica es aquella que se obtiene al convertir la luz solar en electricidad empleando una tecnología basada en el efecto fotoeléctrico. Se trata de un tipo de energía renovable, inagotable y no contaminante [9]. Al menos en 2020 el precio de generación de energía solar fotovoltaica paso de 0.061 USD/kWh a 0.057 USD/kWh [10], por lo tanto, producir hidrógeno verde utilizando energía solar apunta a ser una de las mejores opciones para esta transición energética.

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El hidrógeno se fabrica generalmente mediante el reformado con vapor de gas natural o nafta, o mediante la oxidación parcial de hidrocarburos más pesados. Sólo una pequeña proporción se obtiene mediante electrólisis.

Existen diferentes maneras de obtener hidrógeno tales como el aprovechamiento de desechos orgánicos, que en estudios anteriores demuestran que el uso de diferentes materias primas como desechos de alimentos, partes de plantas y algas permitiría altos volúmenes de producción de hidrógeno. Por ejemplo, un estudio utilizó gasificación de agua supercrítica para generar gas de síntesis rico en hidrógeno a partir de una mezcla de

desechos de alimentos (arroz, pollo, repollo y aceite de cocina) (ver Figura 1).

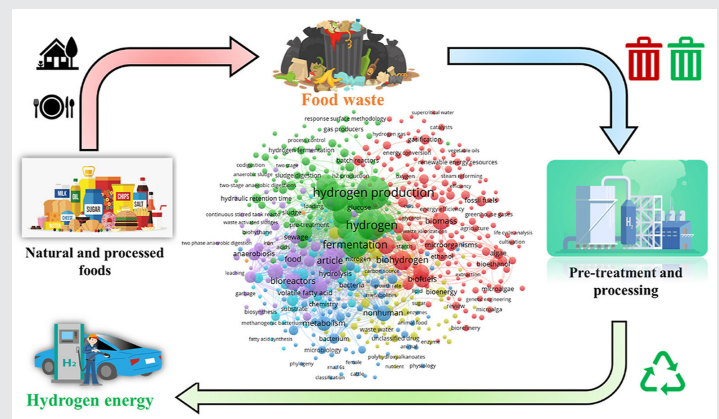


Figura 1. Generación de H₂ a partir de basura orgánica.

Fuente: A. Sridhar, et al. 2022.

Los experimentos discontinuos mostraron un alto rendimiento de hidrógeno de 20.37 mol/kg con una mejora del 32.21 % después de la adición del catalizador (KOH). Se compararon investigaciones similares utilizando procesos de fermentación de una y dos etapas para desechos de alimentos (arroz, verduras, carbohidratos y carne), donde los estudios mostraron una recuperación del 18% de energía mayor en dos etapas en comparación con una etapa con un rendimiento de hidrógeno de 55 ml/g. Esta energía posiblemente podría ser un recurso útil para generar calor y electricidad en automóviles, hogares y áreas comerciales [11].

También, se puede obtener hidrógeno con energía eólica y solar (ver Figura 2) [12]. Un proceso de electrólisis del agua impulsado por una fuente renovable como la energía eólica o solar puede producir cantidades notables de hidrógeno sin ninguna emisión. El hidrógeno producido mediante este método puede ser un excelente combustible alternativo, contribuyendo a los esfuerzos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y reducir la dependencia de los combustibles fósiles [13].

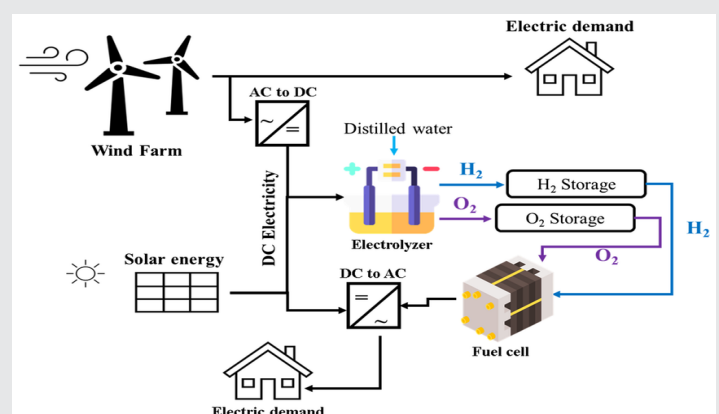


Figura 2. Generación de H₂ a partir de energía eólica y solar.

Fuente: M. Nasser, T. F. Megahed, S. Ookawara y H. Hassan, 2022.

La electrólisis de agua alcalina es uno de los métodos más sencillos para la producción de hidrógeno y ofrece la ventaja de la simplicidad (ver Figura 3). Los desafíos para el uso generalizado de la electrólisis del agua son reducir el consumo de energía, el costo y el mantenimiento y aumentar la confiabilidad, durabilidad y seguridad [14].

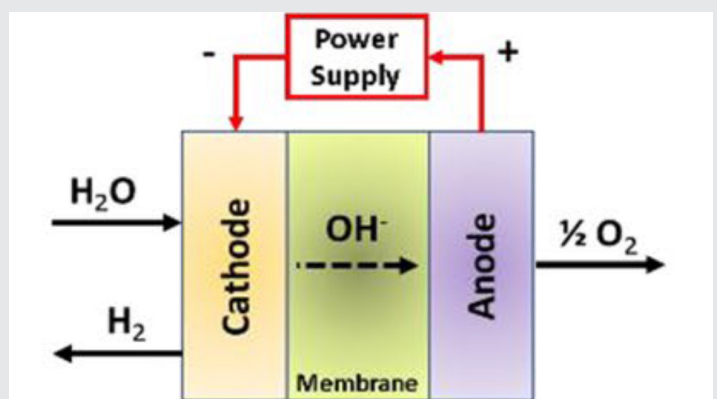


Figura 3. Generación de H₂ a partir de electrólisis alcalina con membrana.

Fuente: M. Nasser, T. F. Megahed, S. Ookawara y H. Hassan, 2022.

Los electrolizadores son reactores electroquímicos que utilizan la electricidad para “dividir” el agua en oxígeno (O₂) e hidrógeno (H₂), un combustible químico almacenable de gran densidad energética que resulta útil para una amplia gama de aplicaciones industriales y de consumo. Actualmente, el mayor costo de la electrólisis del agua es el gasto operativo asociado con la electricidad que se utiliza para impulsar esta reacción cuesta arriba.

MATERIAL Y MÉTODOS

Actualmente, el método más económico para producir hidrógeno es mediante la reforma de gas natural con vapor, aunque este proceso genera emisiones de CO₂ muy altas, contribuyendo significativamente a la huella de carbono. Este trabajo sugiere y examina la posibilidad de un enfoque alternativo que aproveche la energía solar fotovoltaica para la electrólisis del agua, buscando así reducir el impacto ambiental derivado de la fabricación de hidrógeno.

La energía solar fotovoltaica, al ser una fuente limpia y renovable, se estudia aquí como la energía primaria para obtener hidrógeno a través de la electrólisis del agua.

Se investigan desde una perspectiva teórica, tres tecnologías de electrolizadores:

- Membrana intercambiadora de protones (PEM).
- Diafragma en medios alcalinos.
- Sin diafragma en medio ácidos o alcalinos.

De cada una de los electrolizadores se describe su funcionamiento, ventajas y desventajas de implementación técnica y operacional que conlleva a un marco de producción energética limpia y sostenible.

RESULTADOS

Los estudios existentes sugieren que la transformación de radiación luminosa en moléculas de hidrógeno mediante este proceso sería comparable en rendimiento a procesos convencionales. Bajo circunstancias ideales, se precisan cantidades entre 55 y 60 kWh para generar un kilogramo de hidrógeno molecular, cifra acorde con las previsiones de eficiencia energética para sistemas electroquímicos mejorados [15]. Actualmente, dos tecnologías de electrolizadores de baja temperatura dominan el mercado: los electrolizadores PEM y los electrolizadores alcalinos.

Los electrolizadores PEM comerciales se basan en un diseño de conjunto de electrodos de membrana (MEA) de “espacio cero” en el que electrolitos de polímeros sólidos conductores de protones ver Figura 4, como Nafion, se intercalan entre capas de electrodos porosos. Esta arquitectura permite altas densidades de corriente operativa (0,6-2 A cm⁻²) al mismo tiempo que produce H₂ de alta pureza a partir de agua desionizada.

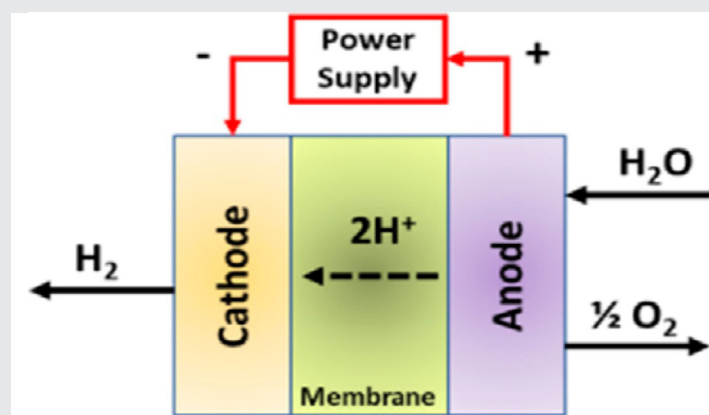


Figura 4. Generación de H₂ a partir de electrólisis PEM.

Fuente: M. Nasser, T. F. Megahed, S. Ookawara y H. Hassan, 2022.

Los electrolizadores alcalinos convencionales dividen el agua a 0,1-0,4 A cm⁻² en un electrolito líquido de 25-35 % en peso de KOH, mientras utilizan un divisor micro poroso conocido como diafragma para separar los dos electrodos ver Figura 5.

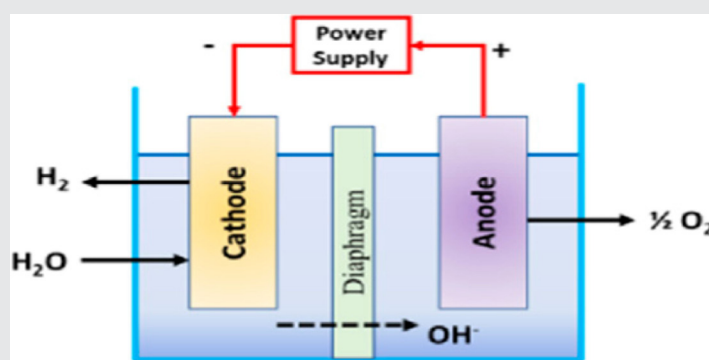


Figura 5. Generación de H₂ a partir de electrólisis alcalina con diafragma.

Fuente: M. Nasser, T. F. Megahed, S. Ookawara y H. Hassan, 2022.

En ambos tipos de electrolizadores, la membrana y el diafragma permiten el transporte de iones entre los electrodos y al mismo tiempo realizan la importante tarea de separar físicamente las especies de productos moleculares de H_2 y O_2 que de otro modo podrían formar una mezcla explosiva [12].

A pesar de sus funciones vitales en el funcionamiento del electrolizador PEM, la membrana trae consigo desventajas, incluida la necesidad de una arquitectura MEA bastante compleja y el riesgo de falla del dispositivo debido a la contaminación o degradación de la membrana en presencia de impurezas. Además de afectar directamente la vida útil del dispositivo y/o los costos de mantenimiento, la cuestión de la durabilidad de la membrana también afecta los costos de capital de los sistemas electrolizadores al imponer requisitos estrictos sobre la pureza del agua y los materiales utilizados dentro del sistema electrolizador. Debido a esta problemática varios componentes del electrolizador PEM suelen estar hechos de titanio costoso, pero resistente a la corrosión.

Por otro lado, los diafragmas utilizados en los electrolizadores alcalinos tienden a ser menos costosos que las membranas de electrolitos poliméricos y se utilizan en una estructura de dispositivo más simple que los electrolizadores PEM, pero también son susceptibles al bloqueo por impurezas y la alta resistencia óhmica asociada con estos divisores y las burbujas, los espacios llenos de líquido entre los electrodos normalmente limitan las densidades de corriente operativa por debajo de $0,4 \text{ A cm}^{-2}$.

Los electrolizadores sin membrana tienen varias ventajas potenciales sobre los dispositivos convencionales [16]. Primero, eliminar la membrana crea la oportunidad de disminuir los costos de capital al reducir la complejidad del dispositivo, los costos de materiales y los costos de ensamblaje. Varias de las celdas electrolizadoras sin membrana se fabrican con tan solo tres componentes esenciales: el ánodo, el cátodo y el cuerpo del dispositivo (ver Figura 6). Esto contrasta marcadamente con una sola celda PEM que contiene no solo una membrana y catalizadores de ánodo/cátodo, sino también capas de difusión de gas, placas bipolares, juntas, ionómero, colectores de corriente y más. Los componentes más costosos de una pila PEM típica [17].

Una segunda ventaja de los electrolizadores sin membrana es su potencial para ser dispositivos con una larga vida útil, alta tolerancia a las impurezas y mayor resistencia a condiciones operativas extremas que dañarían una membrana. Una tercera ventaja potencial de los electrolizadores sin membrana es su capacidad para funcionar en una amplia variedad de electrolitos acuosos, siempre que el electrolito sea suficientemente conductor. Esta versatilidad es posible al hecho de que la conducción iónica a través del espacio del electrolito

líquido entre los electrodos es relativamente insensible al pH del electrolito y a los tipos de iones presentes. Si bien las membranas selectivas de iones en los electrolizadores PEM limitan en gran medida el tipo de electrolito que se puede usar en un dispositivo determinado, se han demostrado electrolizadores sin membrana en soluciones ácidas, alcalinas y neutras [16].

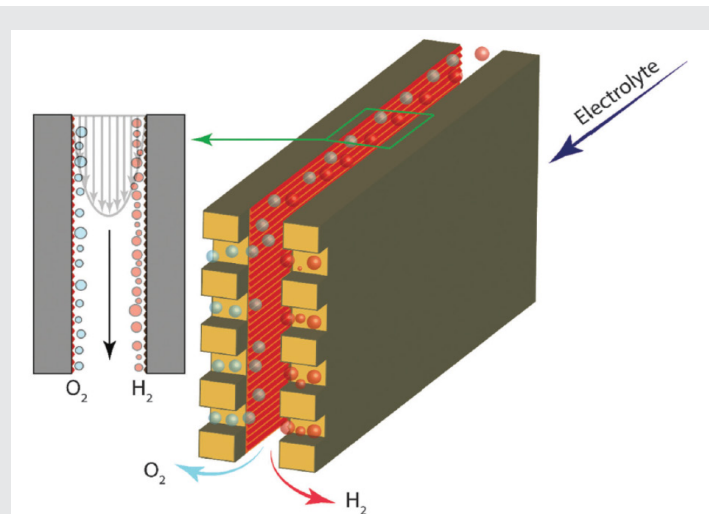


Figura 6. Generación de H_2 a partir de electrólisis alcalina o ácida sin membrana.

Fuente: S. M. H. Hashemi, M. A. Modestino y D. Psaltis, 2015.

A pesar de sus ventajas, los electrolizadores sin membrana también presentan una serie de desafíos. Una desventaja de los electrolizadores sin membrana en comparación con los electrolizadores PEM es una menor eficiencia de voltaje a altas densidades de corriente operativa ($\approx 0,5 \text{ A cm}^{-2}$ o más) debido a mayores pérdidas de IR en solución. Aunque los electrolitos concentrados de H_2SO_4 y KOH tienen una conductividad más alta que las membranas selectivas de iones, la distancia que deben recorrer los iones en muchos electrolizadores sin membrana demostrados hasta la fecha (típicamente milímetros) es mucho más larga que el espesor de una membrana de Nafion en un electrolizador PEM ($\approx 100\text{--}200 \mu\text{m}$) [18].

CONCLUSIONES

En resumen, la energía solar fotovoltaica representa una de las alternativas más alentadoras para la producción de hidrógeno verde, posicionándose como un actor clave en el avance hacia un paradigma energético más limpio y sostenible.

Este cambio hacia la electrólisis impulsada por energía luminosa permitiría una reducción estimada del 90 % en las emisiones de dióxido de carbono en contraste con el procedimiento tradicional de reformado de gas natural, respaldando así los objetivos globales de desarrollo sustentable.

Desde una óptica económica, el análisis señala que la fabricación de hidrógeno mediante fuentes renovables

se está volviendo viable financieramente debido al descenso en los costos de la tecnología fotovoltaica. Con el precio de la generación de electricidad solar bajando de entre 6 y 10 centavos de dólar estadounidense versus entre 5 y 7 centavos por kilowatt-hora, se proyecta que la diferencia en los gastos entre hidrógeno verde y métodos convencionales podría igualarse en la próxima década. A nivel ambiental, este enfoque promueve una menor dependencia de los combustibles fósiles y contribuye significativamente a la reducción de los gases de efecto invernadero, delineando un sendero hacia la mitigación del cambio climático y el cumplimiento de las Metas de Desarrollo Sostenible relacionadas con energía asequible y limpia y la acción ante el calentamiento global.

Una preocupación importante con los electrolizadores de membrana es la susceptibilidad de las membranas a experimentar una mayor resistencia óhmica cuando se exponen a impurezas catiónicas que pueden introducirse a través de la corriente de alimentación de agua o lixiviarse de los componentes dentro del propio sistema [19].

Por otro lado, la tecnología de los electrolizadores, desprovistos de membrana representan una prometedora vía para disminuir costos y aumentar la durabilidad. A pesar de que los electrolizadores de membrana de intercambio protónico y alcalinos siguen siendo predominantes, los dispositivos carentes de membrana demuestran mayor tolerancia a las impurezas y condiciones operativas rigurosas, minimizando así el riesgo de averías y la frecuencia de mantenimiento. En este sentido, la eficiencia energética de estos sistemas a altas densidades de corriente aún constituye desafíos en investigación y desarrollo, desde la academia y las empresas tecnológicas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] B. E. Lebrouhi, J. J. Djoupo, B. Lamrani, K. Benabdelaziz y T. Kousksou, «Global hydrogen development - A technological and geopolitical overview» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, n° 11, pp. 7016-7048, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.12.076>.
- [2] W. Liu, H. Zuo, J. Wang, Q. Xue, B. Ren y F. Yang, «The production and application of hydrogen in steel industry» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, n° 17, pp. 10548-10569, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.123>.
- [3] F. Posso, J. Sánchez, J. L. Espinoza y J. Si-guencia, «Preliminary estimation of electrolytic hydrogen production potential from renewable energies in Ecuador» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, n° 4, pp. 2326-2344, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.11.155>.
- [4] M. Ni, M. K. H. Leung, K. Sumathy y D. Y. C. Leung, «Potential of renewable hydrogen production for energy supply in Hong Kong» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 31, n° 10, pp. 1401-1412, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.11.005>.
- [5] K. Sareen, B. K. Panigrahi, T. Shikhola y R. Nagdeve, «Deep learning solar forecasting for green hydrogen production in India: A case study» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 50 part B, n° 2, pp. 334-351, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.323>.
- [6] U. P. M. Ashik, W. M. A. Wan Daud y H. F. Abbas, «Production of greenhouse gas free hydrogen by thermocatalytic decomposition of methane - A review» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 44, pp. 221-256, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.025>.
- [7] S. Sharma y S. K. Ghoshal, «Hydrogen the future transportation fuel: From production to applications» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, pp. 1151-1158, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.093>.
- [8] B. Mohamed, B. Ali, M. Ahmed, B. Ahmed, L. Salah y D. Rachid, «Study of hydrogen production by solar energy as tool of storing and utilization renewable energy for the desert areas» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, n° 45, pp. 20788-20806, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.034>.
- [9] Iberdrola, «Funcionamiento energía solar fotovoltaica» Iberdrola, 2024. [En línea]. Available: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/que-es-energia-fotovoltaica>. [Último acceso: 11 05 2024].
- [10] IRENA, «International Renewable Energy Agency» 2020. [En línea]. Available: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2020_Summary_ES.pdf?rev=ac2dc583c470469d88ba64f5b014ff5f. [Último acceso: 12 05 2024].
- [11] A. Sridhar, M. Ponnuchami, P. S. Kumar, A. Kapoor y L. Xiao, «Progress in the production of hydrogen energy from food waste: A bibliometric analysis» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, n° 62, pp. 26326-26354, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.258>.
- [12] M. Nasser, T. F. Megahed, S. Ookawara y H. Hassan, «A review of water electrolysis-based systems for hydrogen production using hybrid/solar/wind energy systems» *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, p. 86994-87018, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23323-y>.

[13] K. Almutairi, S. S. Hosseini Dehshiri, S. J. Hosseini Dehshiri, A. Mostafaeipour y H. Techato, «An economic investigation of the wind-hydrogen projects: A case study» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, n° 62, pp. 25880-25898, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.070>.

[14] K. Zeng y D. Zhang, «Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications» *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 36, n° 3, pp. 307-326, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.002>.

[15] F. Troncoso, «Claves del hidrógeno verde» *InduAmbiente* 171, pp. 28-31, 2021. <https://www.induambiente.com/informe-tecnico/calderas/claves-del-hidrogeno-verde> (Último acceso: 12 05 2024).

[16] S. M. H. Hashemi, M. A. Modestino y D. Psaltis, «A membrane-less electrolyzer for hydrogen production across the pH scale» *Energy & Environmental Science*, vol. 8, pp. 2003-2009, 2015.

[17] X. Wang, L. Zhang, G. Li, G. Zhang, Z.-G. Shao y B. Yi, «The influence of Ferric ion contamination on the solid polymer electrolyte water electrolysis performance» *Electrochimica Acta*, vol. 158, pp. 253-257, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.01.140>.

[18] C. Xiang, K. M. Papadantonakis y N. S. Lewis, «Principles and implementations of electrolysis systems for water splitting» *Materials Horizons*, vol. 3, pp. 169-173, 2016. <https://doi.org/10.1039/C6MH00016A>.

[19] D. V. Esposito, «Membraneless electrolyzers for low-cost hydrogen production in a renewable energy future» *Joule*, vol. 1, pp. 651-658, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.07.003>.