

Systematic Review: Hydrogen Generation Technologies Using Solar Energy

Edwar, Velarde-Allazo, M.Sc. , Alexander, Pilco Tasso, Bach. , Karla, Mamani Medina, Bach. , Alberto, Lagos, Msc ⁴ 
Universidad Tecnológica del Perú, Perú, evelarde@utp.edu.pe, u21230217@utp.edu.pe,
u19310697@utp.edu.pe, c16558@utp.edu.pe

Abstract—Hydrogen stands out as the primary energy carrier for transitioning towards renewable energy systems, being versatile in applications previously reliant on fossil fuels. Although current production mostly stems from non-renewable sources like coal and natural gas, its increasing demand raises environmental and resource depletion concerns. The aim of this systematic review is to identify and analyze the best hydrogen (H₂) generation technologies through the capture and utilization of solar energy, overcoming current limitations associated with pollution and dependence on non-renewable materials. To achieve this, PICO questions were employed to obtain keywords. Additionally, using the PRISMA method and established inclusion and exclusion criteria, 50 open-access articles were selected from Scopus, ScienceDirect, and Google Scholar databases. The results compiled various hydrogen production technologies, categorized as renewable and non-renewable depending on the resource used. It was demonstrated that the level and cost of production vary depending on the type of source employed. In conclusion, solid oxide electrolyzer (SOE) technology integrated with concentrated solar heater and photovoltaic systems (CSH-PV) proves most efficient for hydrogen generation, with a production cost of \$1.82 per kg of H₂. Conversely, utilizing non-renewable resources, the most efficient system was the coal hydrogen production process (PCC), reaching a cost of \$1.65 to \$2.2 per kg due to the low cost of its inputs.

Keywords —Hydrogen, generation, solar, industry, costs.

Revisión sistemática: Tecnologías de Generación de Hidrógeno Mediante Energía Solar

Edwar Velarde-Allazo, M.Sc. , Alexander, Pilco Tasso, Bach. , Karla, Mamani Medina, Bach. 
Universidad Tecnológica del Perú, Perú, evelarde@utp.edu.pe, u21230217@utp.edu.pe,
u19310697@utp.edu.pe, c16558@utp.edu.pe

Resumen – El hidrógeno se destaca como el principal vector energético para la transición hacia sistemas de energía renovable, siendo versátil en aplicaciones que antes dependían de combustibles fósiles. Aunque la producción actual proviene en su mayoría de fuentes no renovables, como carbón y gas natural, su creciente demanda plantea preocupaciones ambientales y de agotamiento de recursos. El objetivo de esta revisión sistemática radica en identificar y analizar las mejores tecnologías generadoras de hidrógeno (H_2) mediante la captura y utilización de energía solar, superando las limitaciones actuales asociadas con la contaminación y la dependencia de materiales no renovables. Para ello, se utilizaron las preguntas PICO, donde se obtuvieron las palabras clave. Adicionalmente, mediante el método PRISMA y los criterios de inclusión y exclusión establecidos, se seleccionaron 50 artículos de libre acceso de las bases de datos Scopus, ScienceDirect y Google Scholar. Los resultados recopilaron diferentes tecnologías para la producción de hidrógeno, las cuales se dividen en renovables y no renovables, dependiendo del recurso utilizado. A su vez, se mostró que el nivel y costo de producción varían en función al tipo de fuente empleada. En conclusión, la tecnología de electrolizador de óxido sólido (SOE) con la integración del calentador solar de concentración y sistemas fotovoltaicos (CSH-PV), es el más eficiente para la generación de hidrógeno, con un costo de producción de 1.82 \$/Kg de H_2 . Por otra parte, mediante el uso de recursos no renovables, el sistema de mayor eficiencia fue el proceso de producción de hidrógeno con carbón (PCC), el cual alcanzó un costo de 1.65 y 2.2 \$/Kg, debido al bajo costo de sus insumos.

Palabras clave—Hidrógeno, generación, solar, industria, costos

I. INTRODUCCION

El hidrógeno es considerado como el principal portador de energía para impulsar la transición de los hidrocarburos a los sistemas de energía renovable, debido a su adaptabilidad en aplicaciones que requieran combustibles fósiles[1]. La importancia radica en su utilización de diversas aplicaciones para la generación de energía limpia, transporte y los procesos industriales, tales como la fabricación de acero, refinamiento de petróleo, o la producción de diversos productos químicos como el amoníaco o metanol[2].

La producción industrial de hidrógeno actual se origina principalmente a partir de combustibles fósiles y subproductos industriales. Específicamente, el carbón y el gas natural constituyen aproximadamente el 80% de la producción de hidrógeno, donde a su vez produce emisiones de carbono[3]. A pesar de esto, el aumento de la demanda de energía está emergiendo como una inquietud global preeminente, debido al eventual agotamiento de los recursos fósiles y a la creciente preocupación por los impactos ambientales[4]. Dado el caso, el problema identificado radica en el uso de los recursos y las tecnologías empleadas, debido a la utilización de material no

renovables, los cuales contribuyen a la contaminación ambiental. Por lo que el desafío es buscar e identificar las mejores tecnologías que generen hidrógeno a partir de recursos renovables.

Esta revisión sistemática de la literatura radica en su potencial para informar acerca de las diferentes tecnologías basadas en energía solar para la generación de hidrógeno como fuente sustentable[5]. El hidrógeno generado mediante la electrólisis del agua empleando energía solar puede servir como un recurso energético sostenible y materia prima para satisfacer las necesidades energéticas[6]. Así mismo, el hidrógeno verde destaca como uno de los vectores energéticos más prometedores e interesantes. Debido a sus beneficios, que incluyen una alta eficiencia de conversión, tanto como combustible principal o secundario en diversas aplicaciones [7]. Al recopilar y analizar de manera rigurosa la literatura existente sobre este tema, proporcionará una visión panorámica de los mejores sistemas que se utilizan y proyectados, permitiendo tomar decisiones estratégicas en la búsqueda de una energía más limpia y sostenible. Además, contribuirá al cuerpo de búsqueda de información relevante sobre la producción de hidrógeno mediante tecnologías fotovoltaicas. Esta revisión sistemática tiene como objetivo examinar y sintetizar la literatura actual en relación con las tecnologías con uso de fuentes renovables utilizadas para la generación de hidrógeno verde, mediante la captura y conversión de la energía solar. Las tecnologías más prometedoras según sus niveles de producción, limitaciones, ventajas y desventajas con el fin de ofrecer un enfoque del estado actual, las tendencias emergentes y las áreas clave para futuras investigaciones.

En tal sentido, la estructura del documento se organiza de la siguiente manera. En la sección II, denominada Metodología, se expone el enfoque utilizado para la Revisión Sistemática de la Literatura (RSL), detallando aspectos técnicos que abarcan desde las preguntas de investigación planteadas hasta las operaciones que condujeron a la selección de artículos abordados en esta investigación. La sección III, Resultados, presenta y clasifica los resultados obtenidos tras analizar los trabajos relacionados con las tecnologías estudiadas, siguiendo una perspectiva basada en modelos tecno-económicos y productivos. En la sección IV, Discusión, se aborda un análisis exhaustivo de las tecnologías seleccionadas, ofreciendo una perspectiva que recopile y compare los mejores resultados presentes en los análisis. Finalmente, en la sección V, Conclusiones, Se presentan los descubrimientos más relevantes y se señalan potenciales líneas de investigación futura en el área.

II. METODOLOGIA

En el análisis de la revisión sistemática de la literatura sin metaanálisis, se optó por la metodología PRISMA, ya que esta permite llevar a cabo revisiones sistemáticas de manera más clara y transparente. En línea con la lista de verificación de siete elementos, se creó un diagrama de flujo que consta de cinco etapas. Es importante señalar que esta lista de verificación incluía los elementos esenciales necesarios para llevar a cabo un análisis claro de la literatura.

Se utilizó la base de datos “Scopus” en octubre de 2023, se recuperó un total de 187 estudios. Además, a través de “Science Direct” y “Google Scholar”, se obtuvo 4 estudios de cada una de estas fuentes. Todos los artículos recuperados estaban escritos en inglés y fueron publicados en los últimos 5 años, comprendidos entre 2018 y 2023. De entre estos estudios, se seleccionó “Articles” y “Conference papers” mediante una estrategia de búsqueda específica basada en un enfoque de estilo PICO.

P, población o problemática: ¿Qué es la energía solar o fotovoltaica?

I, intervención: ¿Qué tecnologías capturan energía solar y producen hidrógeno?

C, comparación: En esta RSL no se consideró la comparación.

O, resultados: ¿Qué niveles de eficiencia se obtuvieron en la generación de hidrógeno mediante la aplicación de tecnologías solares?

C, contexto: ¿Qué industrias fabrican hidrógeno verde con energía solar?

Este enfoque tenía como objetivo abordar una pregunta concreta relacionada con la generación de energía renovable: ¿Qué tecnologías capturan energía solar fotovoltaica para generar hidrógeno verde?

La estrategia de búsqueda comenzó con un análisis de datos enfocado en la producción de hidrógeno a través de la energía solar en industrias. Para iniciar el proceso de búsqueda, se identificó las palabras clave siguiendo el estilo PICO. Posteriormente, se llevó a cabo la búsqueda de estas palabras utilizando la función de “título, resumen y palabras clave”, con el propósito de recuperar estudios relacionados a la elaboración de hidrógeno solar. Adicionalmente, se acotó la fórmula de búsqueda para esta revisión sistemática de la literatura:

(“Solar energy” OR “Photovoltaic”) AND (“Renewable technology” OR Technology OR Sustainable OR Capture OR Catch) AND (“Hydrogen production” OR “Hydrogen”) AND (Industry)

P Problema/población Energía fotovoltaica “Solar energy” OR “Photovoltaic”

I Intervención Tecnologías para capturar, aprovechar y generar energía solar "Renewable technology" OR technology OR sustainable OR capture

C Comparación - -

O Resultados Generación de hidrógeno "Hydrogen production" OR "Hydrogen"

C Contexto Industrias Industry

B. Criterios de inclusión y exclusión

Durante esta etapa, se aplicaron 4 criterios de inclusión y 5 de exclusión, de los cuales se asignaron sus respectivas nomenclaturas:

Criterios de inclusión

CI 1 Los estudios incluidos deben abordar la energía solar/fotovoltaica y la generación de hidrógeno.

CI 2 Los estudios incluidos deben aplicar tecnologías para la utilización de la energía solar como fuente principal o de integración.

CI 3 Los estudios se han desarrollado en entornos reales.

CI 4 Los estudios incluidos pueden ser desarrollados en cualquier país del mundo.

Criterios de exclusión

CE 1 Estudios que abarquen temas ajenos a la generación de hidrógeno, como el transporte y almacenamiento.

CE 2 Estudios que abarquen temas políticos y de predicciones.

CE 3 Estudios enfocados en modelos matemáticos.

CE 4 Documentos anteriores a 2018.

Se obtuvo como resultado de la ecuación 195 artículos de 3 bases de datos, de los cuales se exportó mediante el formato CSV y se plasmó en un archivo Excel. Seguidamente, se comenzaron a filtrar los archivos duplicados y se identificó un solo registro duplicado, dando un total de 194 registros cribados. Para aplicar los criterios de inclusión y exclusión, se realizó un análisis detallado de las principales categorías utilizadas: Título y Abstract. Una vez revisados los artículos y evaluados, la cantidad de registros cribados se redujeron a 69, mientras que los registros excluidos fueron 125. Por consiguiente, se comenzó a recuperar los archivos descargándolos en el formato PDF, de los cuales se lograron obtener 50 archivos. Finalmente, se inició el proceso de evaluación para la elegibilidad, donde luego de una revisión exhaustiva, no se excluyeron artículos, finalizando con un total de 50 artículos incluidos para la revisión.

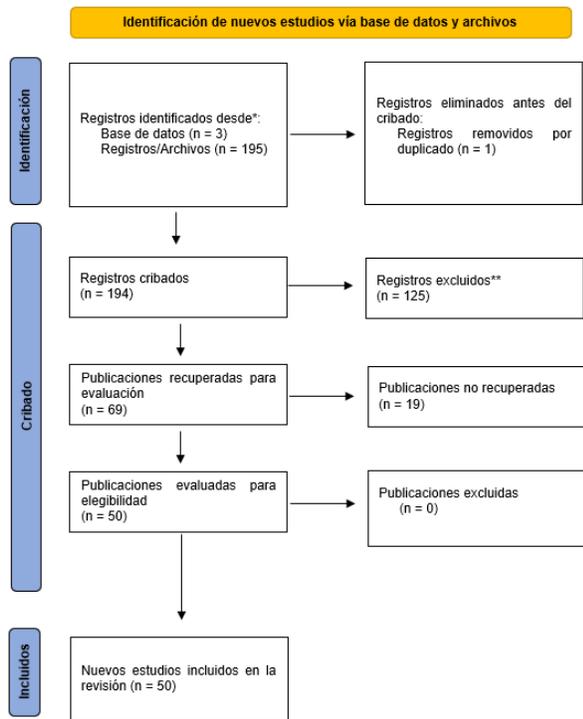


Fig. 1 Diagrama de flujo PRISMA para selección y extracción de datos.

III. RESULTADOS

Los tres primeros estudios presentados fueron publicados en el 2018, y trataron temas relacionados con tecnologías que integran energía solar para la generación de hidrógeno[4], [8], [9]. Con el pasar del tiempo, la cantidad de estudios se incrementaron a 5 en el año 2019. Mientras que, en los años 2020, 2021 y 2022 hubo un incremento, llegando a oscilar entre 8 a 9 estudios durante los años mencionados. Y finalmente, en el año 2023 se realizaron 16 estudios, el cual significa el aumento notable del interés en tecnologías con uso de fuentes renovables para reducir la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y cumplir con los objetivos de la descarbonización[3], como se muestra en la figura 2.

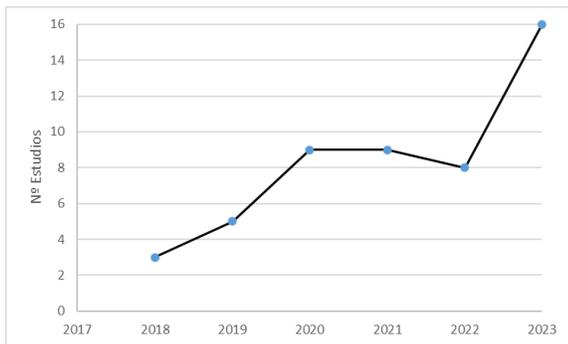


Fig. 2 Tendencia del número de artículos sobre las tecnologías de producción de hidrógeno solar

Dado que el enfoque de la revisión actual abarca un tema de alcance global, se generó un particular interés por conocer la

dispersión geográfica de los artículos publicados. La evaluación se llevó a cabo teniendo en cuenta la afiliación geográfica de los autores de cada artículo, proporcionando así una visión clara de cómo diversos países están abordando la temática actual, como se evidencia en la tabla I.

TABLA I
NÚMERO DE ESTUDIOS REALIZADOS EN LOS PAÍSES

País	N.º estudios
Alemania	2
Arabia saudita	1
Australia	3
Bélgica	1
Brasil	1
Canadá	7
Chile	2
China	13
Emiratos árabes	1
Eslovenia	1
España	2
India	1
Irán	2
Italia	3
Malasia	1
Marruecos	2
Noruega	1
Pakistán	2
Reino unido	2
Singapur	1
Suiza	1

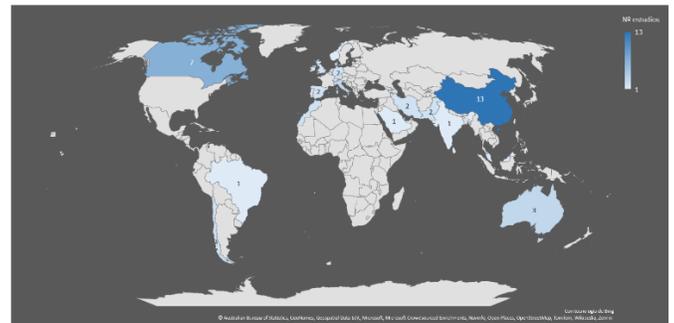


Fig. 3 Distribución geográfica global de artículos publicados sobre las tecnologías de producción de hidrógeno solar

A. Tecnologías encontradas en la RSL

De los 50 artículos examinados, se identificaron 29 tipos de tecnologías para la producción de hidrógeno mediante fuentes de energía renovable y no renovable, donde se detalla su clasificación en la tabla II y la tabla III.

TABLA II
ARTÍCULOS CITADOS SEGÚN TECNOLOGÍAS CON USO DE FUENTES RENOVABLES

Tecnologías	Artículos
Membrana de intercambio de protones (PEM)	[1], [5], [7], [10]–[20]
Electrolizador de óxido sólido (SOE)	[12], [15],[18], [20], [30], [31]
Electrólisis del agua alcalina (AEC)	[2], [6], [12-15], [16], [18], [22][32]
Electrólisis del agua a partir de sistemas unitarios	[33]–[35], [47]
Electrólisis del agua	[36],[38]
Pila de combustible de hidrógeno	[39], [40]

Producción de hidrógeno termoquímico solar (STCH)	[31], [41]
División de agua electroquímica fotovoltaica (PV-EC)	[3]
Tecnología con sistemas integrados	[21]–[29]
La generación de energía solar térmica energía acoplada con Electrolizador de Agua (STP-WE)	[4]
División de agua fotoelectroquímica (PEC)	[3], [42]
Power to H ₂	[43]
Pila fotoelectroquímica (PES)	[44]
Proceso electro-Fenton (EFP)	[44]
La división de agua fotocatalítica (PC)	[3], [9]

TABLA III
ARTÍCULOS CITADOS SEGÚN TECNOLOGÍAS CON USO DE FUENTES NO RENOVABLES

Tecnologías	Artículos
Ciclo cobre-cloro (CueCl)	[20], [45], [46]
Proceso de producción de subproducto de hidrógeno con gas de horno de coque (PPHC)	[35]
El sistema fotocatalítico TiO ₂ /UV con una película sintetizada de TiO ₂ /Ti inmovilizada facetada y co expuesta sensibilizada con “eosina Y” sensible a la luz solar (Eosina-TiO ₂).	[48]
Reformado de Metano con Vapor (SMR)	[8], [35]
Foto degradación del S ₂ H	[49]
Pirolisis	[30]
Proceso electro-Fenton (EFP)	[44]
Reactor PEC-cloroalcalino	[50]
Reactor de alta temperatura refrigerado por gas (HTGR)	[8]
Reformado con vapor convencional del proceso de gas natural (RMCS)	[4]
Reforma solar de metano con vapor utilizando un reactor receptor volumétrico (SSMR-VRR)	[4]
Reforma solar de metano con vapor utilizando sal fundida como portador de calor (SSMR-MS)	[4]
Hidrógeno-Carbón	[35]
Reformado por cambio de gas (GSR)	[19]
Ciclos de yodo-sulfuro (SeI)	[20]
Azufre híbrido (HyS)	[20]

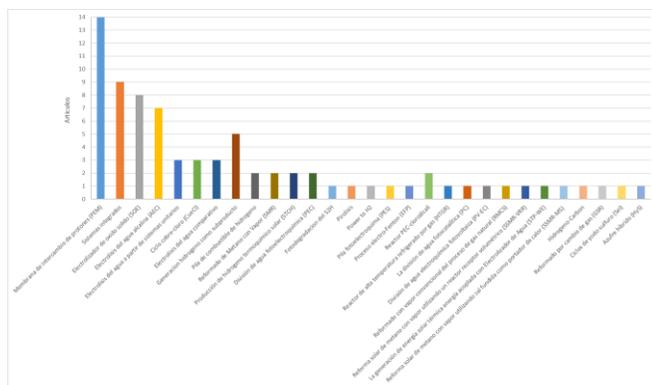


Fig. 4 Cantidad de artículos citados según las tecnologías encontradas

1) Descripción de las tecnologías más relevantes

Membrana de intercambio de protones (PEM): Esta tecnología utiliza energía eléctrica, como la generada por paneles solares fotovoltaicos, para descomponer el agua en sus componentes, hidrógeno y oxígeno; esta membrana facilita el flujo selectivo de protones (iones de hidrógeno) a través de ella, mientras que impide el paso de otros iones, lo que permite una separación efectiva de estos elementos para la obtención de hidrógeno puro [5]. Los resultados de eficiencia y productividad varían según las aplicaciones de esta tecnología, las celdas fotovoltaicas bifaciales pueden aumentar la tasa de producción a 2920 Tn/año, al integrarse con el PEM [11]. A su vez, la implementación de sensores con seguimiento solar, del mismo modo, incrementa la tasa de conversión y la eficiencia energética [7]. Además, el método Greenius evalúa los niveles de radiación y temperatura que afectan directa e indirectamente en la tasa de producción de hidrógeno [1].

El Electrolizador de Óxido Sólido (SOE): Es un sistema que genera hidrógeno mediante la electrólisis del agua, donde utiliza temperaturas elevadas proporcionadas por vapor de agua (>500 °C). En lugar de una solución líquida como electrolito, emplea un electrolito de óxido sólido, lo cual aumenta eficazmente la conductividad iónica y reduce el consumo de energía, conocida como sobrepotencial óhmico [17]. A su vez, una mejora en la disposición de energía fotovoltaica puede incrementar la competitividad y eficiencia de la producción de hidrógeno por sus altas temperaturas [18]. Adicionalmente, una versión híbrida del SOE, en temas termoquímicos, puede incrementar su eficiencia de conversión energética y el volumen de producción [30], [31]. Inclusive, la variación de los factores meteorológicos afecta directamente a la radiación solar y la disponibilidad de recursos energéticos, por lo que, serían indispensables para la producción de hidrógeno [16]

Electrólisis del agua alcalina (AEC): Es un sistema productor de hidrógeno mediante la electrólisis del agua. Los electrolizadores alcalinos utilizan membrana de intercambio de aniones alcalinos para separar los iones hidroxilo (OH⁻) y los iones cationes alcalinos presentes en una solución acuosa. Esta variante de electrólisis permite la generación de hidrógeno y oxígeno a partir del agua, impulsada por una fuente de energía eléctrica, como la energía solar, para llevar a cabo el proceso [12-13], [32]. Los factores climáticos, temperatura, velocidad del viento, y radiación solar, afectan directamente la producción de H₂ por la limitación de la toma de energía en las celdas fotovoltaicas [2].

Tecnologías integradas: Son tecnologías que utilizan y combinan diversas variantes de otras, las cuales aprovechan las cualidades de componentes específicos y las integran en un sistema que trabaja en conjunto para generar hidrógeno. Generalmente, estas combinaciones buscan complementar tecnologías principales con el fin de reducir sus desventajas, aumentar la eficiencia y productividad del sistema. La irradiación solar concentrada con electrolizadores PEM, aumentan drásticamente la tasa de producción de hidrógeno, teniendo en cuenta distintas condiciones climáticas y

temperaturas[23]. Para la electrólisis, el agua es un recurso fundamental para su transformación a hidrógeno y oxígeno, por ende, el tratamiento del agua de mar para la electrólisis es una vía con potencial. Por un lado, la integración entre el sistema de osmosis inversa, para la desalinización del agua de mar, y los electrolizadores PEM presentan una tasa de conversión energética por debajo del promedio[27]; por otro lado, el conjunto de los sistemas de osmosis inversa (RO), concentrador fotovoltaico marino (CPV) y la unidad del reactor E-CEM supera en producción al antes mencionado gracias a la estabilidad del flujo de energía y tasa de almacenamiento[26].

Sistemas de subproducción de hidrógeno: La generación de hidrógeno como subproducto es una forma de obtener hidrógeno de forma simultánea e indirecta. El tratamiento de aguas residuales es la oxidación de los contaminantes mediante la electrólisis del agua y energía solar, y la degradación fotocatalítica de contaminantes orgánicos, específicamente utilizado para reducir el ácido paraaminobenzoico (PABA) con ayuda de rayos UV[48] y celdas fotocatalíticas que facilitan el tratamiento[47].

Sistemas comparativos: Los estudios comparativos de la electrólisis del agua utilizan diferentes tecnologías que comparan sus rendimientos, utilidades, costos y eficiencias en los cuales se catalogan ventajas y desventajas de sus distintos tipos. La electrólisis del agua generalmente utiliza energía solar, donde presenta diferentes variantes, PEM, SOE y AEC; por ende, algunos estudios se dedican a comparar estas tecnologías por distintos criterios de evaluación [6],[12],[15],[16],[18],[29]. Además, algunos artículos comparan recursos renovables como la energía solar y eólica, y recursos no renovables, carbón, gas natural, biomasa y químicos [4],[7],[8],[17],[19],[20],[30],[46].

2) Resultados de costos de producción de hidrógeno (costo/kg)

Durante la revisión de los artículos, muchos de estos mostraban temas económicos, como su costo de producción de kilogramo por hora, día y año, precio de venta, costo total, inversión y la rentabilidad. Asimismo, estos documentos presentaban los costos de producción, utilizando diversas fuentes de energía, tanto renovables como no renovables. En consecuencia, se clasificaron en dos categorías que exhiben sus resultados como se muestran en las figuras 5 y 6.

Resultados de costos de producción de hidrógeno mediante la utilización de fuentes renovables: Los costos de producción de hidrógeno fueron catalogados en función a USD/Kg de H₂; esta categoría recopila los datos de estas tecnologías que usaron recursos renovables como la energía solar, en la figura 5 se puede observar los distintos estudios y sus costos de producción

TABLA IV
TECNOLOGÍAS CON USO DE RECURSOS RENOVABLES Y SUS COSTOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

Tecnología	Costo (USD/Kg)
PEM	6.07
SOE	5.98
AEC	7.37
Energía solar térmica energía con Electrolizador de Agua (STP-WE)	7.9
CHS-PV-SOE	1.82

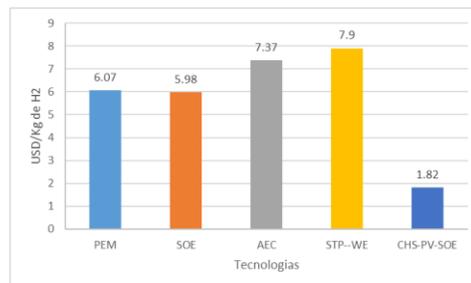


Fig. 5 Costos de producción de H₂ para tecnologías con uso de fuentes renovables

Resultados de costos de producción de hidrógeno mediante la utilización de otras fuentes: Esta segunda clasificación reúne la información de aquellas tecnologías que emplearon fuentes de energía no renovable como el gas natural, carbón, biomasa y químicos, en la figura 6, se pueden apreciar las diferentes investigaciones junto con sus respectivos gastos de producción.

TABLA V
TECNOLOGÍAS CON USO DE RECURSOS NO RENOVABLES Y SUS COSTOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

Art.	Tecnología	Costo (USD/Kg)
[18]	HyS	3
[8]	SMR-HTGR	3.23
[34]	Reforma solar de metano con vapor utilizando un reactor receptor volumétrico (SSMR-VRR)	3.25
[35]	Proceso de producción de hidrógeno con carbón (PCC)	1.65
[28]	Reformado de metano con captura, utilización y almacenamiento de carbono (SMR-CCUS)	2.1
[20]	Sel	2.2

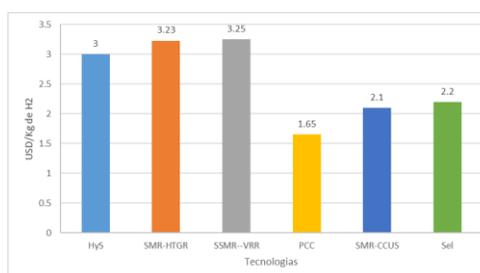


Fig. 6 Costos de producción de H₂ para tecnologías con uso de fuentes no renovables

3) Resultados de producción de hidrógeno Producción total de hidrógeno

En la figura 7, Se han recopilado las cantidades de hidrógeno producido, en kilogramos de H₂ por hora, de cada

artículo que incluía este dato, donde ofrece así una representación visual de la variabilidad en la producción de hidrógeno según los diferentes estudios.

TABLA VI
CANTIDAD DE HIDRÓGENO PRODUCIDO SEGÚN TECNOLOGÍAS CON USO DE FUENTES RENOVABLES

Tecnología	Producción (Kg/hora)
PEM	193.99
PEM-móvil	1.8
Pila fotoelectroquímica de electro-Fenton y electrodiálisis (PES-EFP)	44.67
SOE	32.15
La generación de energía solar térmica energía acoplada con Electrolizador de Agua (STP-WE)	406.39
CHS-PV-SOE	8.33
Ciclo rankine-claus con electrólisis (CRE)	1318.75

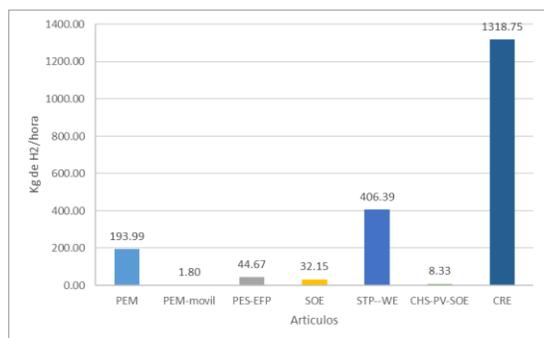


Fig. 7 Capacidad de producción de H₂ de las tecnologías con uso de fuentes renovables

IV. DISCUSIÓN

Según la relación del aspecto económico de los estudios revisados, la tabla IV recopila los costos de producción concernientes a las tecnologías con uso de fuentes renovables consideradas en los casos. Los costos asociados al sistema de Electrólisis de Membrana de Intercambio de protones (PEM) exhiben variabilidad en función de las herramientas y métodos empleados, mediante la utilización del factor de la disponibilidad de radiación solar según sus localizaciones, se llegó al costo de 10.68 \$/kg de H₂ por Garud et al [16], en comparación con 5.25 \$/kg de H₂ por Alzohbi et al [17], 3.2 \$/kg de H₂ por Holmes et al [23] y 4.81 \$/kg de H₂ por Xue et al [35]; también se encontró que la utilización de agua de mar y su tratamiento de osmosis inversa, presenta un costo de 7.21 \$/kg de H₂ por Dokhani et al [27]; mediante el uso del método greenius enfocado en la radiación solar y la temperatura ambiental, evidencia el costo de 5.89 \$/Kg de H₂ por Touili et al [1]; la implementación de sensores de seguimiento solar en las celdas fotovoltaicas influye positivamente en la producción, llegando a un costo de 5.5 \$/Kg de H₂ por Berrada et al [7]. Por otro lado, el sistema SOE varía su rango de costos en función de los distintos procesos y herramientas utilizadas, esta tecnología en promedio presenta un valor de 5.25 \$/Kg de H₂ en industrias por Gabriel et al [20]; mientras que, en la industria automovilística, se simulan procesos donde el costo resulta en

20.47 \$/Kg de H₂ por Gerloff, et al.[12]; a través de la integración de esta tecnología con sistemas de calor solar y almacenamiento fotovoltaico más eficiente, se logra reducir el costo a 1.82 \$/Kg de H₂ por Zhang, et al.[28]; no obstante, la evaluación de costos añadidos por disponibilidad de recursos, almacenamiento y transporte de H₂ en industrias, aumentan el costo a 6.71 \$/Kg de H₂ por L.Zhang, et al.[29]. Asimismo, el sistema AEC se caracteriza por utilizar menor consumo de energía solar, lo cual favorece a la reducción de costos, con ayuda del software AIMMS, se realizó un análisis económico donde se obtuvo un valor de 3.5 \$/Kg de H₂ por Muñoz, et al. [15]; en comparación con los factores de sensibilidad, eficiencia de conversión fotovoltaica y costos totales de otras simulaciones, se obtuvo un costo de producción de 4.56 \$/Kg de H₂ por Huang, et al.[6], y 21.42 \$/Kg de H₂ por Nicita, et al. [32], indicando que es la tecnología más costosa entre las mencionadas anteriormente.

Por otra parte, la Tabla V sintetiza los costos de producción vinculados a las tecnologías con uso de fuentes no renovables, tales como la aplicación del reformado de vapor por metano (SMR), el cual implementa un reactor receptor volumétrico, donde resulta en un costo de 3.25 \$/Kg de H₂ según Chávez et al [34], mientras que la transición a un reactor de alta temperatura refrigerado por gas reduce el costo a 3.23 \$/Kg de H₂ por Schroders et al [8], en cambio, con la inclusión del CCUS (Captura y Almacenamiento de Carbono) conlleva un costo menor de 2.1 \$/Kg de H₂ por Zhang, et al.[28]; además, diversos estudios revelan que los recursos necesarios para la producción inciden en la variabilidad del precio, como el costo de 3 \$/Kg de H₂ mediante el uso del azufre híbrido[18]. En contraste, el ciclo yodo-sulfuro exhibe un costo de 2.2 \$/Kg de H₂ por Gabriel, et al.[20], y el proceso de producción con carbono presenta el costo más bajo, siendo de 1.65 \$/Kg de H₂, lo que lo posiciona como la opción más económica por Xue, et al[35].

Adicionalmente, se resalta la relevancia de la cantidad producida con la finalidad de evaluar las tecnologías con uso de fuentes renovables estudiadas. La aplicación de la tecnología PEM puede variar según la fuente de energía, ya sea solar o eólica, el cual presenta una producción de 43.54 kg de H₂/h por Ishaq, et al[5], mientras que el cambio de celdas solares a bifaciales incrementa este valor a 333.33 kg de H₂/h por Temiz, et al.[11], y con la implementación del método greenius, aumenta la producción a 376.94 kg de H₂/h por Touili, et al [1]; gracias a la versatilidad de adaptación de este sistema, se puede suministrar agua de mar, previamente tratada por osmosis inversa, para producir hidrógeno con un valor de 22.12 kg de H₂/h por Dokhani, et al. [27], también es posible generar este compuesto en plantas móviles, aunque con una disminución considerable de la producción a 1.8 kg de H₂/h por Hogerward, et al.[26]. Mientras que, la integración del sistema SOE con componentes que aumentan su eficiencia, influye en su nivel de producción evidenciando un valor de 32.15 kg de H₂/h por Butt, et al.[24] y 8.33 kg de H₂/h por Zhang, et al[28]. También se

encontró que el proceso electro-Fenton y electrodiálisis cuenta con un nivel de producción de 44.67 kg de H₂/h por Hu, et al [44], mientras que la utilización de energía solar térmica con electrolizador de agua aumenta su nivel a 406.39 kg de H₂/h por Chavez, et al.[34], y la integración entre la electrólisis y el ciclo rankine-claus genera el mayor nivel de producción, donde se alcanza a 1318.75 kg de H₂/h por Novosel, et al. [46], siendo este el más alto entre todas las tecnologías evaluadas.

Por lo que, se realizaron hallazgos significativos que contribuyen a la búsqueda de las mejores tecnologías de producción de hidrógeno solar, el sistema productivo más utilizado es el PEM, por a su facilidad de adquisición y versatilidad de recursos[12]. Seguidamente, los sistemas integrados, gracias a la colaboración con otras tecnologías que reducen sus desventajas individuales y aumentan la eficiencia de producción[3]. Además, los sistemas SOE y AEC muestran una tendencia de uso similar. Por un lado, el sistema SOE proporciona una producción de hidrógeno estable y requiere de un bajo consumo de energía debido a sus procesos termoquímicos[9]. Mientras que, el sistema AEC requiere de soluciones y membranas alcalinas, lo cual reduce el consumo y costo de energía favoreciendo en su producción, eficiencia y rentabilidad [19].

V. CONCLUSIÓN

Esta investigación identificó los tipos de tecnologías para la producción de hidrógeno mediante la captura y uso de energía solar, la distribución geográfica de los países, factores económicos y productivos del hidrógeno. Las tecnologías más eficientes para la generación de hidrógeno con recursos renovables son los sistemas SOE y PEM que alcanzaron costos de producción de 5.98 y 6.07 \$/Kg de H₂ respectivamente; asimismo, dentro de las tecnologías con uso de recursos no renovables, los mejores sistemas fueron el PCC y Sel, que alcanzaron costos de 1.65 y 2.2 \$/Kg de H₂ respectivamente, aunque estas últimas emitan GEI. Tomando en consideración todas las tecnologías más eficientes y utilizadas, la de mayor eficiencia con recursos renovables fue el SOE, el cual alcanza un costo de producción de 1.82 \$/Kg de H₂ debido a su integración con otros sistemas solares (CHS-PV); por otra parte, el menor costo, con un valor de 1.65 \$/Kg de H₂, fue el sistema PCC, debido al uso de recursos no renovables (carbón). En perspectiva de futuras investigaciones, se recomienda realizar estudios acerca de tecnologías con uso de fuentes renovables integradas para la generación de hidrógeno solar, debido al soporte brindado entre los sistemas que impulsan considerablemente la producción, sería recomendable implementar sistemas de apoyo diseñados para la captura de energía solar, ya que esto podría resultar en un aumento significativo en los niveles de producción, el desarrollo en este campo están en constante evolución, y se espera que nuevas tecnologías y innovaciones surjan en el futuro.

REFERENCIAS

- [1] S. Touili, A. A. Merrouni, Y. El Hassouani, A.-I. Amrani, and A. Azouzoute, "A techno-economic comparison of solar hydrogen production between Morocco and Southern Europe," in *2019 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS)*, IEEE, Apr. 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/WITS.2019.8723659.
- [2] D. Mazzeo, M. S. Herdem, N. Matera, and J. Z. Wen, "Green hydrogen production: Analysis for different single or combined large-scale photovoltaic and wind renewable systems," *Renew Energy*, vol. 200, pp. 360–378, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.09.057.
- [3] Y. Zheng, M. Ma, and H. Shao, "Recent advances in efficient and scalable solar hydrogen production through water splitting," *Carbon Neutrality*, vol. 2, no. 1, p. 23, Sep. 2023, doi: 10.1007/s43979-023-00064-6.
- [4] C. Likkasit, A. Maroufmashat, A. Elkamel, H. Ku, and M. Fowler, "Solar-aided hydrogen production methods for the integration of renewable energies into oil & gas industries," *Energy Convers Manag*, vol. 168, pp. 395–406, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.04.057.
- [5] H. Ishaq, O. Siddiqui, G. Chehade, and I. Dincer, "A solar and wind driven energy system for hydrogen and urea production with CO₂ capturing," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 6, pp. 4749–4760, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.01.208.
- [6] X. Huang, Y. Qu, Z. Zhu, and Q. Wu, "Techno-Economic Analysis of Photovoltaic Hydrogen Production Considering Technological Progress Uncertainty," *Sustainability*, vol. 15, no. 4, p. 3580, Feb. 2023, doi: 10.3390/su15043580.
- [7] A. Berrada and M. A. Laasmi, "Technical-economic and socio-political assessment of hydrogen production from solar energy," *J Energy Storage*, vol. 44, 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.103448.
- [8] S. Schröders, K. Verfondern, and H.-J. Allelein, "Energy economic evaluation of solar and nuclear driven steam methane reforming processes," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 329, pp. 234–246, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.nucengdes.2017.08.007.
- [9] E.-C. Su, J.-T. Lee, Y.-J. Gong, B.-S. Huang, and M.-Y. Wey, "Photocatalytic conversion of ethylenediaminetetraacetic acid dissolved in real electroplating wastewater to hydrogen in a solar light-responsive system," *Water Science and Technology*, vol. 77, no. 12, pp. 2851–2857, Aug. 2018, doi: 10.2166/wst.2018.276.
- [10] S. Zhong, K. Yang, and Y. Wang, "A Novel Evaluation Method of Hydrogen Production from Coal Based on AHP and GRA-TOPSIS," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2021, pp. 1–9, Oct. 2021, doi: 10.1155/2021/8991994.

- [11] M. Temiz and I. Dincer, "A unique bifacial PV and hydrogen-based cleaner energy system with heat recovery for data centers," *Appl Therm Eng*, vol. 206, p. 118102, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118102.
- [12] N. Gerloff, "Comparative Life-Cycle-Assessment analysis of three major water electrolysis technologies while applying various energy scenarios for a greener hydrogen production," *J Energy Storage*, vol. 43, p. 102759, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102759.
- [13] V. Kalchschmid, V. Erhart, K. Angerer, S. Roth, and A. Hohmann, "Decentral Production of Green Hydrogen for Energy Systems: An Economically and Environmentally Viable Solution for Surplus Self-Generated Energy in Manufacturing Companies?," *Sustainability*, vol. 15, no. 4, p. 2994, Feb. 2023, doi: 10.3390/su15042994.
- [14] L. Guicun and L. Dejin, "Design Scheme of Block Smart Energy Internet System," *E3S Web of Conferences*, vol. 252, p. 03034, Apr. 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202125203034.
- [15] M. T. Muñoz Díaz, H. Chávez Oróstica, and J. Guajardo, "Economic Analysis: Green Hydrogen Production Systems," *Processes*, vol. 11, no. 5, p. 1390, May 2023, doi: 10.3390/pr11051390.
- [16] S. S. Garud, F. Tsang, I. A. Karimi, and S. Farooq, "Green hydrogen from solar power for decarbonization: What will it cost?," *Energy Convers Manag*, vol. 286, 2023, doi: 10.1016/j.enconman.2023.117059.
- [17] G. AlZohbi, "Green Hydrogen Generation: Recent Advances and Challenges," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 1050, no. 1, p. 012003, Jul. 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1050/1/012003.
- [18] S. E. Hosseini and M. A. Wahid, "Hydrogen from solar energy, a clean energy carrier from a sustainable source of energy," *Int J Energy Res*, vol. 44, no. 6, pp. 4110–4131, May 2020, doi: 10.1002/er.4930.
- [19] C. Arnaiz del Pozo and S. Cloete, "Techno-economic assessment of blue and green ammonia as energy carriers in a low-carbon future," *Energy Convers Manag*, vol. 255, p. 115312, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.115312.
- [20] K. S. Gabriel, R. S. El-Emam, and C. Zamfirescu, "Technoeconomics of large-scale clean hydrogen production – A review," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 72, pp. 30788–30798, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.10.081.
- [21] L. Onwuemezie, H. Gohari Darabkhani, and M. Moghimi Ardekani, "Hybrid solar-driven hydrogen generation by sorption enhanced–chemical looping and hydrocarbon reforming coupled with carbon capture and Rankine cycle," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 52, pp. 19936–19952, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.02.035.
- [22] L. Luo *et al.*, "In situ construction of hierarchical graphitic carbon nitride homojunction as robust bifunctional photoelectrocatalyst for overall water splitting," *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, vol. 95, no. 3, pp. 758–769, Mar. 2020, doi: 10.1002/jctb.6261.
- [23] I. Holmes-Gentle, S. Tembhurne, C. Suter, and S. Haussener, "Kilowatt-scale solar hydrogen production system using a concentrated integrated photoelectrochemical device," *Nat Energy*, vol. 8, no. 6, pp. 586–596, Apr. 2023, doi: 10.1038/s41560-023-01247-2.
- [24] M. S. Butt *et al.*, "Power Generation Analysis of Terrestrial Ultraviolet-Assisted Solid Oxide Electrolyzer Cell," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 3, p. 996, Jan. 2022, doi: 10.3390/en15030996.
- [25] F. J. Beck, "Rational Integration of Photovoltaics for Solar Hydrogen Generation," *ACS Appl Energy Mater*, vol. 2, no. 9, pp. 6395–6403, Sep. 2019, doi: 10.1021/acsaem.9b01030.
- [26] J. Hogerwaard, I. Dincer, G. F. Naterer, and B. D. Patterson, "Solar methanol synthesis by clean hydrogen production from seawater on offshore artificial islands," *Int J Energy Res*, vol. 43, no. 11, pp. 5687–5700, Sep. 2019, doi: 10.1002/er.4627.
- [27] S. Dokhani, M. Assadi, and B. G. Pollet, "Techno-economic assessment of hydrogen production from seawater," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 26, pp. 9592–9608, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.200.
- [28] Y. Zhang *et al.*, "Techno-economic analysis of solar hydrogen production via PV power/concentrated solar heat driven solid oxide electrolysis with electrical/thermal energy storage," *J Energy Storage*, vol. 72, p. 107986, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.107986.
- [29] L. zhang and R. zhang, "The conception and countermeasures of 'green hydrogen' industrial chain in Chengdu area," *E3S Web of Conferences*, vol. 236, p. 02018, Feb. 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202123602018.
- [30] L. Onwuemezie, H. Gohari Darabkhani, and M. Moghimi Ardekani, "Integrated solar-driven hydrogen generation by pyrolysis and electrolysis coupled with carbon capture and Rankine cycle," *Energy Convers Manag*, vol. 277, p. 116641, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.enconman.2022.116641.
- [31] J. Perry, T. W. Jones, J. M. Coronado, S. W. Donne, and A. Bayon, "Thermodynamic analysis of a novel two-step high temperature thermo-electrochemical water splitting cycle," *Energy*, vol. 276, p. 127412, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.127412.
- [32] A. Nicita, G. Maggio, A. P. F. Andaloro, and G. Squadrito, "Green hydrogen as feedstock: Financial analysis of a photovoltaic-powered electrolysis plant,"

- Int J Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 20, pp. 11395–11408, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.02.062.
- [33] A. Boretti, “Production of hydrogen for export from wind and solar energy, natural gas, and coal in Australia,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 7, pp. 3899–3904, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.12.080.
- [34] E. Chavez-Angel *et al.*, “Exploring the Potential of Green Hydrogen Production and Application in the Antofagasta Region of Chile,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 11, p. 4509, Jun. 2023, doi: 10.3390/en16114509.
- [35] F. Xue, J. Su, and P. Li, “Technical Research on Hydrogen Supply Chain Industry,” *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 558, no. 2, p. 022040, Aug. 2020, doi: 10.1088/1755-1315/558/2/022040.
- [36] D. Tonelli, L. Rosa, P. Gabrielli, K. Caldeira, A. Parente, and F. Contino, “Global land and water limits to electrolytic hydrogen production using wind and solar resources,” *Nat Commun*, vol. 14, no. 1, p. 5532, Sep. 2023, doi: 10.1038/s41467-023-41107-x.
- [37] G. Wang, Y. Chao, and Z. Chen, “Promoting developments of hydrogen powered vehicle and solar PV hydrogen production in China: A study based on evolutionary game theory method,” *Energy*, vol. 237, p. 121649, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.121649.
- [38] E. Solomin, S. P. Selvanathan, S. Kumarasamy, A. Kovalyov, and R. Maddappa Srinivasa, “The Comparison of Solar-Powered Hydrogen Closed-Cycle System Capacities for Selected Locations,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 9, p. 2722, May 2021, doi: 10.3390/en14092722.
- [39] S. Pedrazzi, E. Morini, M. Nasti, S. Pizzileo, and G. Allesina, “Green Hydrogen Powered Forklifts in Industrial Transport: Case Study of an Italian Fruit and Vegetable Market,” *International Journal of Heat and Technology*, vol. 40, no. 1, pp. 145–150, Feb. 2022, doi: 10.18280/ijht.400117.
- [40] F. Rubio, C. Llopis-Albert, and A. J. Besa, “Optimal allocation of energy sources in hydrogen production for sustainable deployment of electric vehicles,” *Technol Forecast Soc Change*, vol. 188, p. 122290, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.techfore.2022.122290.
- [41] X. Qian *et al.*, “Outstanding Properties and Performance of CaTi_{0.5}Mn_{0.5}O_{3-δ} for Solar-Driven Thermochemical Hydrogen Production,” *Matter*, vol. 4, no. 2, pp. 688–708, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.matt.2020.11.016.
- [42] Y. Wang, H. Shi, K. Cui, L. Zhang, S. Ge, and J. Yu, “Reversible electron storage in tandem photoelectrochemical cell for light driven unassisted overall water splitting,” *Appl Catal B*, vol. 275, p. 119094, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.apcatb.2020.119094.
- [43] H. Elsheikh and V. Eveloy, “Assessment of variable solar- and grid electricity-driven power-to-hydrogen integration with direct iron ore reduction for low-carbon steel making,” *Fuel*, vol. 324, p. 124758, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2022.124758.
- [44] L. Hu *et al.*, “Development and evaluation of an electro-Fenton-based integrated hydrogen production and wastewater treatment plant coupled with the solar and electro dialysis units,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 177, pp. 568–580, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.psep.2023.06.072.
- [45] S. Sadeghi and S. Ghandehariun, “Environmental impacts of a standalone solar water splitting system for sustainable hydrogen production: A life cycle assessment,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 50, pp. 19326–19339, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.01.234.
- [46] U. Novosel, M. Živić, and J. Avsec, “The production of electricity, heat and hydrogen with the thermal power plant in combination with alternative technologies,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 16, pp. 10072–10081, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.01.253.
- [47] F. C. Marques, J. C. M. Silva, C. P. Libardi, R. R. de Carvalho, G. F. Sequine, and G. M. Valane, “Hydrogen production by photovoltaic-electrolysis using aqueous waste from ornamental stones industries,” *Renew Energy*, vol. 152, pp. 1266–1273, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.01.156.
- [48] J. A. Khan *et al.*, “Synthesis of eosin modified TiO₂ film with co-exposed {001} and {101} facets for photocatalytic degradation of para-aminobenzoic acid and solar H₂ production,” *Appl Catal B*, vol. 265, p. 118557, May 2020, doi: 10.1016/j.apcatb.2019.118557.
- [49] M. Lashgari and M. Ghanimati, “An excellent heterojunction nanocomposite solar-energy material for photocatalytic transformation of hydrogen sulfide pollutant to hydrogen fuel and elemental sulfur: A mechanistic insight,” *J Colloid Interface Sci*, vol. 555, pp. 187–194, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.jcis.2019.07.095.
- [50] C. Acar and I. Dincer, “Investigation of a novel photoelectrochemical hydrogen production system,” *Chem Eng Sci*, vol. 197, pp. 74–86, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.ces.2018.12.014.