ISBN: 978-628-96613-1-6. ISSN: 2414-6390. Digital Object Identifier: https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2025.1.1.807

Production of Green Hydrogen and Industrial Applications: A Systematic Review

Huaman Minga, Nolver William[1], Coello Acosta, Alberto Deyvid[2], Mansilla Alza, Oscar Rafael[3]
[1,2,3]Universidad Tecnológica del Perú, Perú, u21230227@utp.edu.pe[1], C26206@utp.edu.pe[2]
omansilla@utp.edu.pe[3]

Abstract*–The green hydrogen is considered the energy of the future and capable of replacing conventional fuels in those sectors that are most difficult to decarbonize. conventional fuels in those sectors that are most difficult to decarbonize. The objective of this review is to analyze how the production and use of green hydrogen contribute to mitigate atmospheric pollution in the contribute to mitigating atmospheric pollution in industry, by identifying industry, identifying efficient production methods and assessing its environmental impact compared to other fossil fuels. environmental impact compared to other fossil fuels. To this end, a systematic review without meta-analysis a systematic review without meta-analysis using the PICOC strategy. A Based on the established inclusion and exclusion criteria, 39 open-access articles were selected from 31 open-access articles were selected from the Scopus, Scopus and Scopus databases. The results showed that water electrolysis is the predominant method for producing green hydrogen, using electrolyzers and electrolyzers using electrolyzers and renewable energies such as solar and wind.In conclusion, the studies reviewed indicate a significant reduction in emissions of CO_2 and other pollutants by using green hydrogen in the other pollutants by using green hydrogen instead of fossil fuels. Although economic and infrastructural challenges exist, the adoption of green hydrogen holds promise for a cleaner and more sustainable economy.*

Keywords: *hydrogen, production, renewable energy, energy transition, sustainable development*

Producción de Hidrógeno Verde y Usos en la industria: Revisión Sistemática

Huaman Minga, Nolver William[1], Coello Acosta, Alberto Deyvid[2], Mansilla Alza, Oscar Rafael[3]
[1,2,3]Universidad Tecnológica del Perú, Perú, u21230227@utp.edu.pe[1], C26206@utp.edu.pe[2]
omansilla@utp.edu.pe[3]

Resumen*– El hidrógeno verde es considerado la energía del futuro y capaz de sustituir a los combustibles convencionales en aquellos sectores más difíciles de descarbonizar. Tiene como objetivo esta revisión, analizar cómo la producción y uso del hidrógeno verde contribuyen a mitigar la contaminación atmosférica en la industria, identificando métodos de producción eficientes y evaluando su impacto ambiental en comparación con otros combustibles fósiles. Para ello, se realizó una revisión sistemática sin metaanálisis utilizando la estrategia PICOC. A partir de los criterios de inclusión y exclusión establecidos, se seleccionaron 39 artículos de libre acceso de las bases de datos Scopus. Los resultados mostraron que la electrólisis del agua es el método predominante para producir hidrógeno verde, empleando electrolizadores y energías renovables como la solar y eólica. En conclusión, los estudios revisados indican una reducción significativa de las emisiones de CO_2 y otros contaminantes al usar hidrógeno verde en lugar de combustibles fósiles. Aunque existen desafíos económicos y de infraestructura, la adopción de hidrógeno verde es prometedora para una economía más limpia y sostenible.

Palabras clave: hidrógeno, producción, energías renovables, transición energética, desarrollo sostenible

I. Introducción

En los últimos cinco años a nivel mundial, tanto industrias como estados han comenzado a plantearse la transición al uso de fuentes de energía más limpias y sostenibles, que permitan la reducción de agentes contaminantes. Es en este contexto es donde aparece el hidrógeno verde como una de las soluciones más viables y sostenibles [1].

Alemania fue la pionera en adoptar la tecnología de hidrógeno verde con el objetivo de acelerar el proceso de transición energética, instalando plantas de electrólisis del agua para que operen en base a energías renovables. En el mismo sentido, el hidrógeno verde ha sido tema de gran interés para Japón, donde se han establecido proyectos piloto de diferentes magnitudes para la industria de transportes y de generación de energía. Asimismo, en los Países Bajos, se han establecido ambiciosos objetivos de producción y utilización en sectores trascendentales con programas de incentivos y financiamiento. Del mismo modo, Estados Unidos ha desarrollado iniciativas a nivel federal y estatal para la producción y la implementación del hidrogeno verde, otorgando fondos para la innovación. Los casos mencionados muestran la importancia del hidrógeno verde en los diferentes países, que van desde proyectos piloto a iniciativas de gran escala [1].

El hidrógeno verde es un combustible con cero emisiones de contaminantes que se genera por electrólisis del agua, con energía proveniente de fuentes renovables, como la energía solar, eólica o hidroeléctrica. Además de ser una fuente de energía renovable, el hidrógeno verde puede usarse como materia prima en la fabricación de otros productos químicos, lo que lleva a una disminución de las emisiones de carbono y un cambio a una economía más limpia y sostenible [2].

No obstante, hay varios desafíos pendientes antes de que pueda desarrollarse con éxito una economía del hidrógeno. Uno de los desafíos actuales se refiere a los altos costos relacionados al consumo de electricidad en la separación del hidrogeno y oxígeno. Otros costos influyentes podrían ser los del transporte y distribución, cuyo precio influye significativamente en el precio del hidrógeno en el punto de uso. A pesar de estos desafíos, muchos países que están implementando estrategias gubernamentales para incluir el hidrógeno en sus planes de transición energética, como parte de la mejora de los planes nacionales existentes para integrar fuentes de energía renovable y promover la producción de energía limpia [3].

En general, la producción y uso de hidrógeno verde tienen numerosos beneficios ambientales en comparación con el hidrógeno convencional derivado de combustibles fósiles, contribuyendo a la descarbonización de sectores clave de la economía y a la mitigación de los impactos ambientales asociados con la producción y uso de combustibles fósiles [1].

La problemática energética a nivel mundial radica en la dependencia de combustibles fósiles, para satisfacer la demanda energética. Estos recursos son finitos. Además, que contribuyen al cambio climático debido a las emisiones de gases de efecto invernadero y generan impactos ambientales negativos durante su extracción, transporte y combustión. En este escenario, el uso de hidrógeno verde como vector energético representa una alternativa prometedora para abordar estas limitaciones, ya que proporciona un mecanismo adecuado y eficiente tanto para almacenar como para transportar energía [4].

A pesar de que se puede producir hidrógeno verde en diversas partes del mundo, algunas barreras hacen que el nivel de competitividad sea significativamente diferente. La disponibilidad de recursos, la infraestructura de transporte y distribución, las políticas y regulaciones gubernamentales son limitaciones que afectan los costos de producción y el potencial comercial de cada región. Además, la producción de hidrógeno verde para su uso en la industria presenta desafíos específicos debido a la falta de información y estudios sobre

23rd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Engineering, Artificial Intelligence, and Sustainable Technologies in service of society". Hybrid Event, Mexico City, July 16 - 18, 2025.

los requerimientos tecnológicos, económicos y ambientales para su implementación en cada país. Aunque existen experiencias internacionales en este campo, la información disponible puede no ser directamente aplicable al contexto de otro país, lo que dificulta la identificación del proceso a seguir para la producción de hidrógeno verde en otros lugares [3].

En la actualidad, no se ha realizado una revisión sistemática de literatura (RSL) sobre la producción de hidrógeno verde en el Perú. Sin embargo, existen revisiones de este tema para otros países que abordan los principales desafíos sociales, tecnológicos, económicos y legales para la implementación de estos proyectos. En una revisión sistemática [5] se destaca la importancia del hidrógeno verde en la transición energética, reconociendo al mismo tiempo los desafíos que deben abordarse mediante avances tecnológicos, apoyo político, colaboración internacional, aprendizaje de otras experiencias.

El presente trabajo pretende mostrar y comprender el estado actual de la producción del hidrogeno verde en las diversas industrias a partir de su producción y utilidad. Por lo tanto, el objetivo de esta RSL es analizar cómo la producción y uso del hidrógeno verde contribuyen a mitigar la contaminación atmosférica producida por la industria, identificando métodos de producción eficientes y evaluando su impacto ambiental en comparación con otros combustibles convencionales.

II. METODOLOGÍA

A. *Estrategia de búsqueda:*

El trabajo se llevó a cabo siguiendo la metodología de una revisión sistemática de la literatura sin metaanálisis ya que no se realizó un procedimiento estadístico para generalizar los resultados, con el objetivo de analizar la producción y uso del hidrógeno verde en la industria y como esta contribuye a mitigar la contaminación atmosférica. Para tal efecto, se implementó la estrategia de las siglas en inglés de las palabras: Population, Intervention, Comparison, Outcome and Context (PICOC) como herramienta fundamental para la búsqueda de información relevante y pertinente.

Según la estrategia PICOC, se adaptó a cuatro componentes, excluyendo la comparación debido a su irrelevancia en el contexto de la investigación. Los componentes que fueron identificados fueron los siguientes; Problema: identificado como contaminación atmosférica, Intervención: producción de hidrogeno verde, Resultados: disminución de la contaminación y Contexto: industria.

El siguiente paso en este proceso de búsqueda de información fue elaborar la pregunta PICOC, derivada de la disgregación de cada componente. Teniendo como resultado lo siguiente pregunta general: ¿Cómo la producción y uso del hidrógeno verde contribuye a mitigar la contaminación atmosférica generada por el sector industrial?

Para la selección y posterior análisis de artículos científicos, se decidió trabajar con la base de datos Scopus en la plataforma Elsevier. Posteriormente, se introdujo la ecuación de búsqueda en la base de datos, utilizando operadores booleanos (AND, OR). Luego se aplicaron filtros de tipo de documento y de tiempo tomando estudios entre los años 2019 y 2024. Como resultado, se obtuvieron 295 documentos. La ecuación resultante fue la siguiente:

(TITLE-ABS-KEY ("Inadequate infrastructure" OR "high costs" OR waste OR decarbonization OR "sustainable energy") AND TITLE-ABS-KEY ("Wind energy" OR "solar energy" OR "hydro energy" OR "Chemical reagents") AND TITLE-ABS-KEY ("green hydrogen" OR production) AND TITLE-ABS-KEY (industry OR "industrial sector")) AND PUBYEAR > 2017 AND PUBYEAR < 2025 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "re") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "cp"))

B. *Criterios de inclusión y exclusión:*

Se procedió a elaborar los criterios de elegibilidad que permitieron delimitar los artículos enfocados en el tema de la investigación, los cuales fueron seleccionados considerando los siguientes criterios de inclusión: estudios que aborden la producción de hidrógeno verde (CI1), estudios que analicen los usos del hidrógeno verde en la industria (CI2), estudios que reportar resultados de impacto ambiental durante la producción de hidrógeno verde en la industria(CI3) y estudios que aborden la problemática ambiental generada por los combustibles o energías utilizadas en la industria.

Así mismo se elaboró los criterios de exclusión: estudios que abordan al hidrogeno en diferentes contextos no relacionados a energías renovables (CE1), estudios que aborden el hidrogeno verde sin mencionar su producción y usos (CE2) y estudios sobre la producción hidrogeno en laboratorios o en contextos simulados (CE3).

C. *Proceso de selección de estudios:*

De acuerdo con [44] en su revisión menciona que el protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) tiene como objetivo principal ayudar a los autores a informar de manera clara y completa sobre el propósito, métodos y resultados de sus revisiones sistemáticas, facilitando así la evaluación y replicación de los estudios. En ese sentido; el análisis, selección y filtración de artículos fue una parte fundamental de este trabajo de investigación. Para describirlo de manera práctica y entendible, se utilizó PRISMA.

En primer lugar, los 295 estudios iniciales obtenidos mediante la aplicación de la ecuación de búsqueda en Scopus pasaron a la siguiente etapa del protocolo PRISMA.

En la siguiente etapa, se procedió a realizar el primer cribado mediante la lectura del título y resumen de los estudios, donde se encontraron varios artículos que no tenían ninguna relación con el tema de estudio. En esta etapa se descartaron 238 artículos, quedando 57 artículos seleccionados.

En el segundo cribado a texto completo, se verificó que, de los 57 artículos filtrados en el primer cribado, 6 artículos no pudieron ser recuperados por ser de pago o suscripción, siendo este una limitante del estudio. Teniendo como resultado solo 51 artículos seleccionados para su elegibilidad.

Posteriormente, a los 51 artículos seleccionados para su elegibilidad se les aplicaron los criterios de inclusión y exclusión. Después de una lectura más detallada, se descartaron 12 estudios: 5 estudios que no abordaban la producción y los usos del hidrógeno verde, 3 que se enfocaban en experimentos de laboratorio, y 4 que trataban temas de hidrógeno verde en otros contextos (político, económico, social, etc.). Como resultado, se seleccionaron 39 artículos.

Finalmente, estos 39 artículos formaron parte de la revisión sistemática de literatura. Todo el proceso de selección de artículos se puede observar de manera gráfica en el siguiente diagrama de flujo PRISMA.

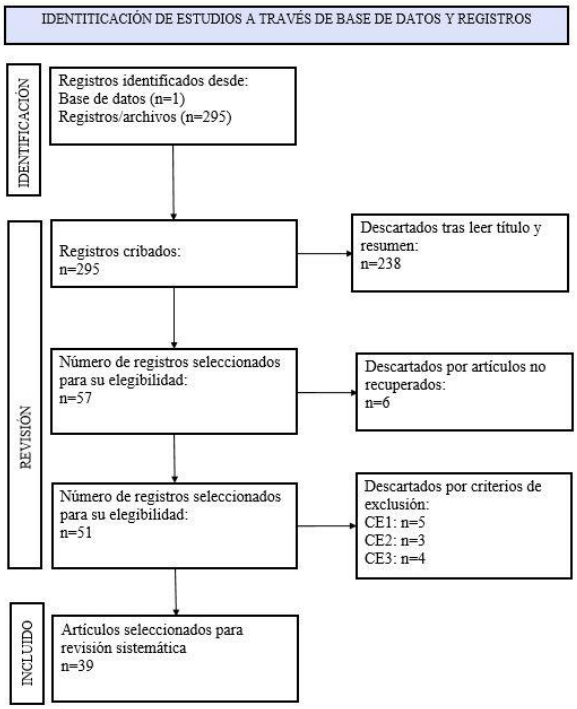


Fig. 1. *Flujograma PRISMA*

III. RESULTADOS

En la presente Revisión Sistemática de la Literatura (RSL), los resultados se dividieron en dos partes. Primero, se realizó un análisis de los datos bibliométricos y, posteriormente, se analizaron las características de los estudios que permitieron responder las preguntas planteadas, las cuales se describen a continuación.

A. Análisis bibliométrico de los estudios seleccionados:

Con respecto a los datos bibliométricos de los artículos seleccionados se procedió a extraer la siguiente información: (autores, título de estudio, revista y número de citaciones). Entre los resultados, destaca el estudio [44] con mayor número de citaciones, alcanzando un total de 113. Este estudio fue publicado en la revista "Applied Catalysis B: Environmental" y se desarrolló en Pakistán, la cantidad de citaciones se debe a que el artículo presenta un estudio de caso enfocado en el uso de una placa de TiO_2 modificada con eosina. Los resultados del estudio sugieren que esta tecnología es prometedora para la sostenibilidad ambiental, ya que utiliza energía solar renovable y elimina eficientemente contaminantes orgánicos. A continuación, los datos bibliométricos de los estudios se presentan en la Tabla 1.

TABLA I
LISTA DE ESTUDIOS REVISADOS SOBRE LA INDUSTRIA 4.0 Y MÉTODOS TRADICIONALES

Ref.	artículo	revista	citas
[6]	Membranes for hydrogen rainbow toward industrial decarbonization: Status, challenges and perspectives from materials to processes	Chemical Engineerig Journal	2
[7]	Perspectives on the Development of Technologies for Hydrogen as a Carrier ofSustainable Energy	Energies	2
[8]	Insight into synergistic enhancement of photothermal catalytic hydrogen production by plasmonic Au-NP/TiO2 in the presence of glycerol	Energy Conversion and Management	5
[9]	A Review of Hydrogen Production from Onboard Ammonia Decomposition: Maritime Applications of Concentrated Solar Energy and Boil-Off Gas Recovery	Fuel	8
[10]	Power sector effects of green hydrogen production in Germany	Energy Policy	3
[11]	Survey of Technical-Economic Perspectives and Challenges for the GreenHydrogen Market in Brazil	2023 15th IEEE International Conference on Industry Applications, INDUSCON 2023 Proceedings	0
[12]	Analysis on CO2 emissions, green hydrogen requirement and geo-storage potential of hydrogen for decarbonization of industrial operations in southeastern coastof India	International Journal of Hydrogen Energy	1

[13]	A Research Analysis: The Implementation of Innovative Energy Technologies and Their Alignment with SDG 12	Eastern European Journal of Enterprise Technologies	0
[14]	Cost and thermodynamic analysis of wind- hydrogen production via multi-energy systems	Energy Conversion and Management	0
[15]	Highly Efficient Nitrogen-Fixing Microbial Hydrogel Device for Sustainable Solar Hydrogen Production	Advanced Materials	0
[16]	The overarching role of electric vehicles, power-to-hydrogen, and pumped hydro storage technologies in maximizing renewable energy integration and power generation in Sub Saharan Africa	Journal of Energy Storage	11
[17]	Technology-enabled circular business models for the hybridisation of wind farms: Integrated wind and solar energy, power- to-gas and power-to-liquid systems	Sustainable Production and Consumption	17
[18]	Green hydrogen production from photovoltaic power station as a road mapto climate change mitigation	Clean Energy	0
[19]	Pinch and exergy assessment of an innovative hydrogen and methane purification process configuration based on solar renewable energy	Fuel	1
[20]	Innovative Technology Strategies for the Sustainable Development of Self-Produced Energy in the Colombian Industry	Sustainability (Switzerland)	0
[21]	Energy and exergy analysis of waste heat and solar energy assisted for hydrogen production system: A case study	International Journal of HydrogenEnergy	0
[22]	Biohybrid Molecule-Based Photocatalysts for Water Splitting Hydrogen Evolution	ChemPlusChem	1
[23]	Green hydrogen from solar power for decarbonization: What will it cost?	Energy Conversion and Management	17
[24]	Green steel: Synergies between the Australian iron ore industry and the production of green hydrogen	International Journal of Hydrogen Energy	5
[25]	Advancing Catalysts by Stacking Fault Defects for Enhanced Hydrogen Production: A Review	Advanced Materials	0
[26]	Green Hydrogen Value Chain: Modelling of a PV Power Plant Integrated with H2 Production for Industry Application	Energies	0
[27]	Development and evaluation of an electro- Fenton-based integrated hydrogen production and wastewater treatment plant coupled with the solar and electrodialysis units	Process Safetyand Environmental Protection	12
[28]	Assessment of paper industry decarbonization potential via hydrogen in a multi-energy system scenario: A case study	Smart Energy	2
[29]	A unique bifacial PV and hydrogen-based cleaner energy system with heat recovery for data centers	App lied Thermal Engineering	8
[30]	Hydrogen and the decarbonization of the energy system in europe in 2050: A detailed model-based analysis	Renewable and Sustainable Energy Reviews	47
[31]	Green Hydrogen Generation: Recent Advances and Challenges	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science	2
[32]	Comparative Life-Cycle-Assessment analysis of three major water electrolysis technologies while applying various energy scenarios for a greener hydrogen production	Journal of Energy Storage	47
[33]	Using Leaves and Needles of Trees as Sorption Materials for the Extraction of Oil and Petroleum Products from Solid and Water Surfaces	Lecture Notesin Civil Engineering	3
[34]	Integrating Solar Energy, Desalination, andElectrolysis	Solar RRL	14
[35]	Green Ammonia as a flexible hydro-electricity carrier for Nepal	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science	1
[36]	Green hydrogen production potential inWest Africa – Case of Niger	Renewable Energy	30
[37]	Microbial electrolysis cells and power-to- gas technology – A novel onsite industrial wastewater treatment and CCU arrangement	Water and Environment Journal	2
[38]	Study on the applicability of sustainable development policies in electricity generation systems in Colombia	International Journal of Energy Economics and Policy	3
[39]	Flexible power and hydrogen production: Finding synergy between CCS and variablerenewables	Energy	34
[40]	Molybdenum-Based Co-catalysts in Photocatalytic Hydrogen Production: Categories, Structures, and Roles	ChemSusChm	32

[41]	A Novel Thermochemical Long Term Storage Concept: Balance of Renewable Electricity and Heat Demand in Buildings	Frontiers in Energy Research	21
[42]	Hydrogen production by photovoltaic- electrolysis using aqueous waste from ornamental stones industries	Renewable Energy	18
[43]	Investigation of a novel photoelectrochemical hydrogen production system	Chemical Engineering Science	17
[44]	Synthesis of eosin modified TiO2 film with co-exposed {001} and {101} facets for photocatalytic degradation of para-aminobenzoic acid and solar H2 production	Applied Catalysis B: Environmental	113

En relación con los estudios revisados según su país de origen podemos mencionar que el país que tiene mayor incidencia en investigaciones sobre la producción de hidrogeno verde es China [6], [8], [14], [16], [22], [27] y [40] y en segundo lugar se encuentra Alemania con 4 publicaciones [10], [32], [36] y [41] tal como se muestra en la Figura 2.

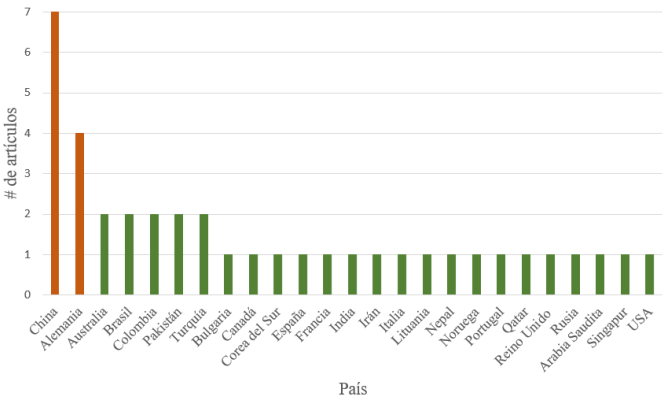


Fig. 2. *Distribución geográfica de artículos*

Respecto a las publicaciones por año, el 2023 se destaca como el año con la mayor incidencia de publicaciones, con un total de 16 artículos [6], [7], [8], [9], [10], [11], [13], [15], [16], [17], [20], [22], [23], [24], [27] y [28], tal como se puede visualizar en la Figura 3.

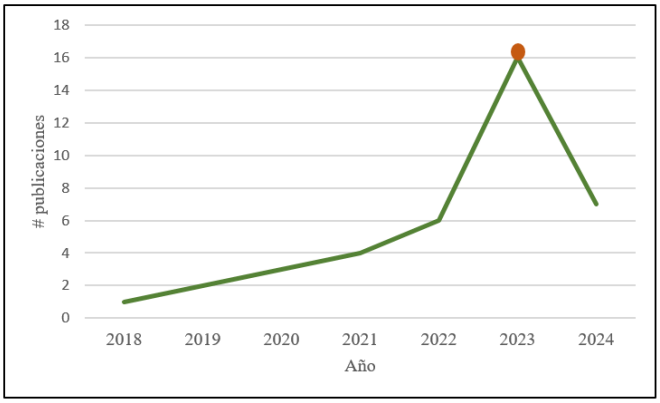


Fig. 3. *Distribución de los artículos según año de publicación*

En el análisis de los datos bibliométricos de los 39 artículos seleccionados, se generó un diagrama neuronal para evaluar la incidencia de las palabras clave. De las 158 palabras clave identificadas, se estableció un umbral mínimo de 2 incidencias, obteniéndose un total de 25 palabras. Además, se puede evidenciar que las palabras con tonalidades de color azul y verde tienen más incidencias en publicaciones antiguas durante el periodo comprendido entre 2018 y 2024, mientras que la tonalidad roja está presente en publicaciones recientes, como se muestra en la figura 4.

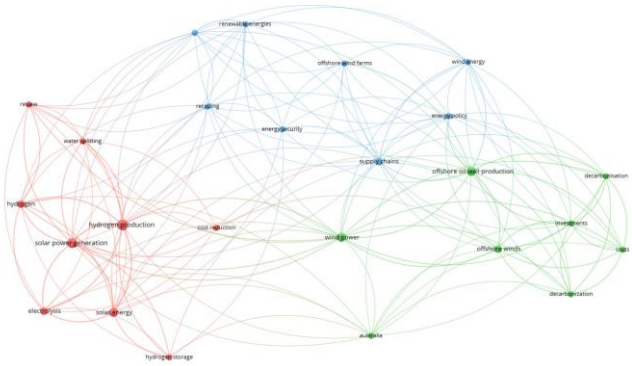


Fig. 4. Red neuronal de incidencias de palabras claves

B. Características de los estudios:

1) Enfoque y contexto: con respecto a los artículos analizados se evidencia que el sector donde se viene trabajando más con hidrógeno verde es la industria de energía, de acuerdo a los autores [6], [8], [9], [10], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [22], [27], [29], [32], [34], [35], [36], [39], [40], [42] y [43], existiendo una amplia diferencia, frente a los demás sectores como la industria del acero y transporte, tal como se puede ver en la Figura 5.

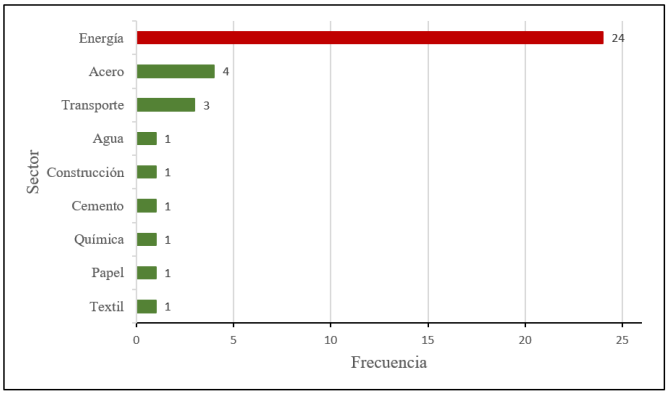


Fig. 5. *Sectores industriales donde se viene trabajando con hidrógeno verde*

En cuanto a las tendencias en la producción de hidrógeno, se encontró el desarrollo de sistemas híbridos, es decir, sistemas duales de energía renovable y de hidrocarburos para uso general, tienen mayor incidencia, como se evidencia en los siguientes artículos: [14], [16], [17], [20], [21], [22], [23], [27], [37] y [42], seguidos de su utilización como combustibles en las labores de transporte, como se puede observar en la Figura 6.

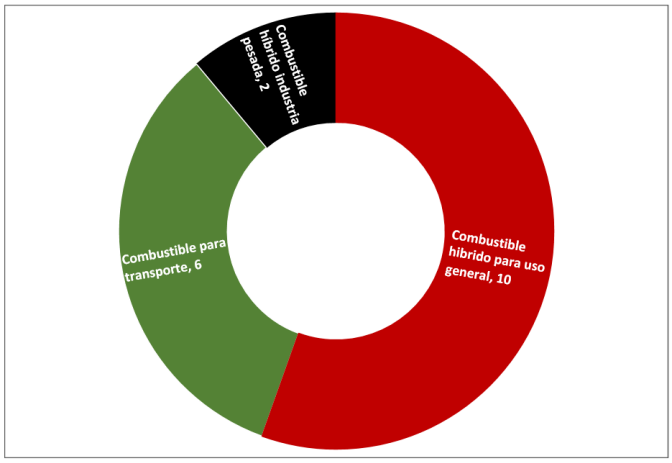


Fig. 6. *Tendencias emergentes en cuanto al uso del hidrógeno verde*

2)Diagnóstico: de acuerdo con el problema identificado, podemos mencionar que el principal contaminante en la industria es el dióxido de carbono CO_2, sin embargo, se resalta también al monóxido de carbono CO, que se encuentra en una segunda ubicación como contaminante del aire, tal cual, se puede observar en la Figura 7.

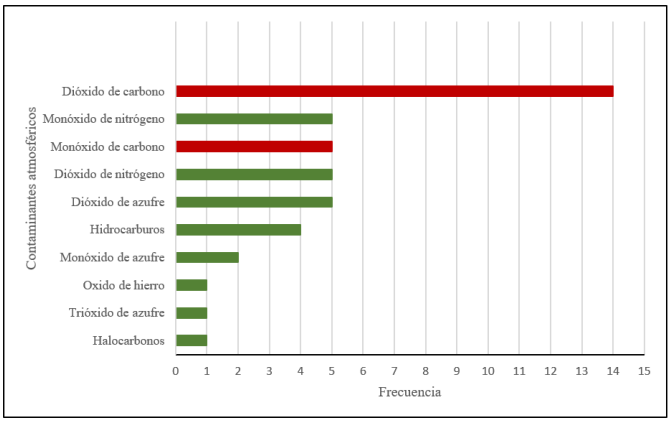


Fig. 7. *Principales contaminantes atmosféricos*

En cuanto a las principales fuentes de contaminación industrial, se destacan los procesos industriales [6], [7], [10], [12], [13], [15], [18], [20], [23], [25], [28], [30], [33], [37], [38] y [42], representando aproximadamente las tres cuartas partes, seguido de los vehículos de transporte, como se puede apreciar en la Figura 8.

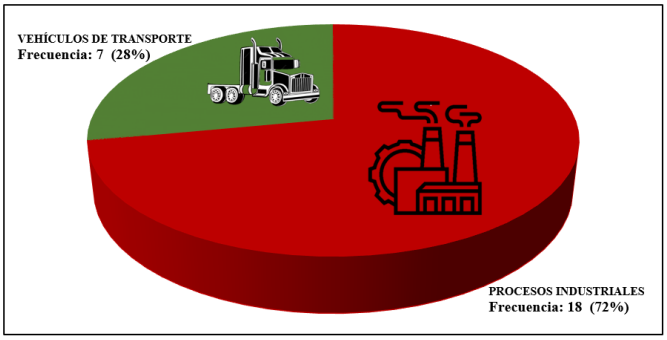


Fig. 8. *Fuentes de contaminación más importantes*

Respecto a los impactos ambientales por el uso de energías provenientes de fuentes convencionales, los autores afirman que es la contaminación del aire [6], [7], [10], [12], [15], [18], [23], [28], [30] y [42], la más relevante sobre las otras formas contaminación como son: la del agua y de la tierra.

3) Modelo de solución: además, en cuanto a la producción, se puede detectar que en la mayoría de estudios se trabajó con la electrólisis del agua como método de producción de hidrógeno verde, según los siguientes autores [6], [7], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [17], [18], [21], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [36], [38] y [42], como se puede ver en la Figura 9.

Respecto a las tecnologías utilizadas, los autores mayormente emplearon electrolizadores [6], [9], [10], [17], [21], [24], [29], [30], [31], [32], [34], [36], [42] y [43].

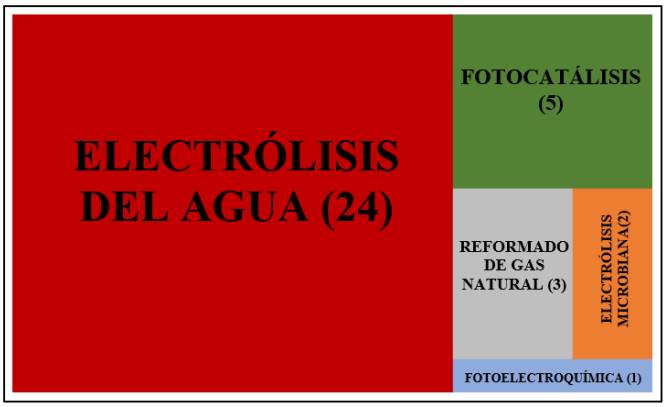


Fig. 9. *Principales métodos de producción de hidrógeno*

4) Resultados: de los estudios revisados, se encontró resultados de indicadores que midieron la concentración del dióxido de carbono CO2 en el aire emitido por el consumo de diésel, versus el consumo de hidrógeno verde, teniendo como resultado una menor concentración de CO2 en el aire al consumir hidrogeno, estos resultados fueron determinados por los siguientes autores [6], [8], [11], [14], [15], [17], [18], [20], [21], [24], [26], [27], [28], [29], [30], [32], [36], [37], [38], [41], [42] y [43]. En cuanto a las emisiones asociadas al consumo de hidrógeno verde, los autores afirman que hay bajas emisiones de CO2 [6], [7], [17], [18], [23], [24], [28], [29], [30], [32], [36], [37], [38] y [39], como se puede visualizar en la Tabla 5.

TABLA II:
CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR CONSUMO DE HIDROGENO

Ref.	**Indicadores de medición de contaminación atmosférica (Diesel vs Hidrógeno)**				**Emisiones asociadas**
	Indicador	**Diesel**	**H2**	**Resultados** (Mayor o menor contaminación de H2)	
[6]	Concentraciones de CO_2 (µg/m³)	35	9	Menor	Bajas emisiones CO2
[7]	ND	ND	ND	ND	Bajas emisiones CO2
[8]	Concentraciones de CO_2 (µg/m³)	36	9	Menor	0
[9]	ND	ND	ND	ND	ND
[10]	ND	ND	ND	ND	ND
[11]	Concentraciones de CO_2 (µg/m³)	49	23	Menor	0
[12]	Emisiones de CO2 por unidad de producción de energía (kg CO2/MWh)	421	220	Menor	0
[13]	Emisiones de CO2 por unidad de producción de energía (kg CO2/MWh)	453	235	Menor	Son mejores en comparación con los combustibles fósiles
[14]	Concentraciones de CO_2 (µg/m³)	35	9	Menor	0
[15]	Concentraciones de CO_2 (µg/m³)	51	15	Menor	0
[16]	ND	ND	ND	ND	ND
[17]	Concentraciones de CO_2 (µg/m³)	34	12	Menor	Bajas emisiones CO2
[18]	Concentraciones de CO_2 (µg/m³)	52	21	Menor	Bajas emisiones CO2
[19]	ND	ND	ND	ND	ND
[20]	Concentraciones de CO_2 (µg/m³)	33	9	Menor	0
[21]	Concentraciones de CO_2 (µg/m³)	52	19	Menor	0
[22]	ND	ND	ND	ND	ND
[23]	ND	ND	ND	ND	Bajas emisiones CO2
[24]	Concentraciones de CO_2 (µg/m³)	54	19	Menor	Bajas emisiones CO2
[25]	ND	ND	ND	ND	ND
[26]	Concentraciones de CO_2 (µg/m³)	55	23	Menor	0
[27]	Concentraciones de CO_2 (µg/m³)	36	9	Menor	0
[28]	Concentraciones de CO_2 (µg/m³)	51	23	Menor	Bajas emisiones CO2
[29]	Concentraciones de CO_2 (µg/m³)	44	23	Menor	Bajas emisiones CO2
[30]	Concentraciones de CO_2 (µg/m³)	36	10	Menor	Bajas emisiones CO2
[31]	ND	ND	ND	ND	ND
[32]	Concentraciones de CO_2 (µg/m³)	36	10	Menor	Bajas emisiones CO2
[33]	ND	ND	ND	ND	ND
[34]	ND	ND	ND	ND	ND
[35]	ND	ND	ND	ND	ND
[36]	Concentraciones de CO_2 (µg/m³)	50	19	Menor	Bajas emisiones CO2
[37]	Concentraciones de CO_2 (µg/m³)	36	9	Menor	Bajas emisiones CO2
[38]	Concentraciones de CO_2 (µg/m³)	49	23	Menor	Bajas emisiones CO2
[39]	Emisiones de CO2 por unidad de	450	218	Menor	Bajas emisiones CO2

	producción de energía (kg CO2/MWh)				
[40]	ND	ND	ND	ND	ND
[41]	Concentraciones de CO_2 ($\mu g/m^3$)	36	10	Menor	0
[42]	Concentraciones de CO_2 ($\mu g/m^3$)	48	23	Menor	0
[43]	Concentraciones de CO_2 ($\mu g/m^3$)	36	10	Menor	0
[44]	ND	ND	ND	ND	ND

En la Figura 10 podemos observar los parámetros estadísticos de las mejoras obtenidas con las intervenciones, para lo cual, se ha tomado como data inicial la encontrada en la Tabla 2. Para calcular la mejora se procedió con restar el nivel del dióxido de carbono final del inicial y esta diferencia, dividirla entre el valor inicial de dióxido de carbono, es decir, el nivel alcanzado de CO2 antes de la intervención. Podemos observar que los porcentales de mejora oscilan entre [47.73% y 75.00%], con una concentración alta de los datos alrededor de los valores medios, como la mediana 67.71% y el promedio con 63.47%.

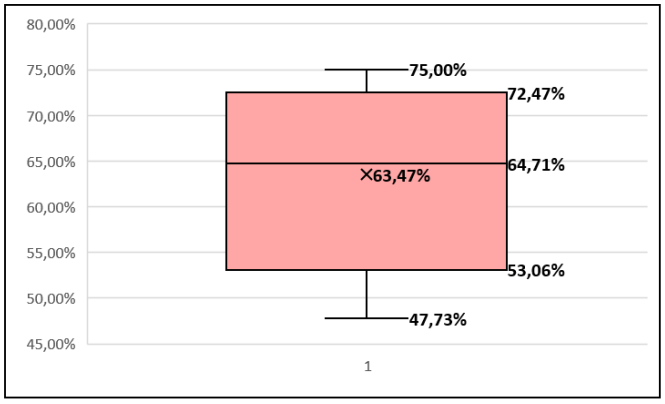


Fig. 10. *Parámetros estadísticos descriptivos de las mejoras obtenidas con las intervenciones*

IV. Discusión

La RSL tuvo como objetivo analizar la producción de hidrógeno verde y sus aplicaciones en la industria, evaluando su potencial para mitigar la contaminación atmosférica y avanzar hacia un mundo más sostenible.

En cuanto al contexto, la revisión sistemática de [5] se enfocó en la industria de producción de hidrógeno verde. A diferencia, de la presente RSL que se enfocó tanto en industrias que producen como aquellas que utilizan hidrógeno verde para reducir la contaminación ambiental. Ejemplos de esto se pueden ver en los trabajos de [11] en la industria del acero y [21] en la industria textil, lo que sugiere que el uso del hidrógeno verde está ganando relevancia en diferentes sectores industriales.

Respecto a los vínculos de contaminación presentes en las industrias, la revisión de [5] identificó como principales contaminantes al CO_2, NO_X y SO_X, generados por el uso de combustibles convencionales en procesos industriales y transporte. De manera similar, esta RSL encontró que estos mismos contaminantes son predominantes en los procesos industriales y vehículos de transporte, con un impacto significativo en la contaminación del aire y la salud pública. Adicional a estos contaminantes, los estudios de [6] y [13] incluyen compuestos orgánicos volátiles (COV) y otros materiales particulados. Si bien, todos los trabajos coinciden que los principales contaminantes industriales son el CO_2, NO_X y SO_X, esta diferencia en los contaminantes adicionales puede probablemente explicarse por el uso de combustibles convencionales en diferentes industrias y procesos industriales empleados.

En relación con el método de producción, [5] destaca la electrólisis utilizando energías renovables como el principal método de producción de hidrógeno verde. La presente revisión sistemática coincide con dicha afirmación, señalando que la electrólisis es el método más comúnmente empleado. A diferencia de otros trabajos de investigación que utilizaron otros métodos emergentes; por ejemplo, [15] que utiliza la fotocatálisis y [19] que usa el reformado de gas natural. Esta diversidad en los métodos de producción refleja la búsqueda continua de nuevas técnicas que aprovechen los recursos disponibles en cada ubicación y sector industrial.

En cuanto a los resultados, esta revisión presenta estudios que midieron la concentración de CO_2 en el aire emitido por el consumo de diésel, mostrando una clara reducción de la contaminación cuando se utiliza hidrógeno verde como fuente de energía. Estos resultados son similares a las investigaciones realizadas por [6], [7] y [17] también confirman que el uso de hidrógeno verde reduce significativamente los contaminantes industriales. Basado en estos resultados, se podría afirmar que producir de hidrógeno verde no solo es técnicamente viable, sino también beneficioso para el medio ambiente; pues, la mayoría de los estudios reportan una disminución en las concentraciones de CO_2 y otros contaminantes atmosféricos, con efectos positivos en la calidad del aire y la salud pública [6], [7] y [11].

Las limitaciones de esta revisión incluyen la variabilidad en la calidad de los estudios revisados y la falta de datos específicos para ciertos contextos regionales, como Latinoamérica. Además, la producción de hidrógeno verde sigue enfrentando barreras económicas y de infraestructura que pueden afectar su implementación a gran escala. Estos factores deben considerarse al interpretar los resultados y al planificar futuras investigaciones. Así mismo, una limitante de la presente revisión fue la cantidad de estudios realizados sobre el tema y a los que no se pudo tener acceso por ser

artículos de paga o de suscripción, lo que limito el análisis a profundidad sobre el uso del hidrogeno verde.

V. Conclusiones

En general, esta RSL muestra que la adopción de hidrógeno verde puede llevar a una reducción importante de las emisiones de dióxido de carbono, contribuyendo así a la descarbonización. De manera más específica, se encontró que la electrólisis del agua es el método predominante para la producción de hidrógeno verde, utilizando energías renovables como la solar y eólica.

Los principales hallazgos indican que la producción y uso de hidrógeno verde puede reducir significativamente las emisiones de CO_2 en comparación con los combustibles fósiles tradicionales. Los resultados en los diversos estudios reportan una menor concentración de CO2 en el aire, además de bajas emisiones al consumir hidrogeno verde.

La industria energética es el principal sector de aplicación del hidrógeno verde, con proyectos innovadores que integran energías renovables para su producción. Según los estudios revisados, las industrias que actualmente utilizan hidrógeno verde, como la siderúrgica y la textil, han obtenido excelentes resultados en la reducción de emisiones contaminantes.

Agradecimientos

A la Universidad Tecnología del Perú (UTP) por facilitarnos el acceso a bases de datos esenciales para la recuperación de los estudios utilizados en la presente RSL.

Referencias

[1] Chavez-Angel, E., Castro-Alvarez, A., Sapunar, N., Henríquez, F., Saavedra, J., Rodríguez, S. “Exploring the Potential of Green Hydrogen Production and Application in the Antofagasta Region of Chile”. *Energies*. *16*(2). 1-12, 2023. https://doi.org/10.3390/en16114509

[2] Azadnia, A., McDaid, C., Andwari, A., Hosseini, S. “Green hydrogen supply chain risk analysis: A european hard-to-abate sectors perspective”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. *182*(1). 2023. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113371

[3] Hilali, İ., Işıker, Y., Ulker, N. “The hydrogen perspective for Türkiye, which is on the Asia-Europe energy transition route”. Can Türkiye become hydrogen hub”. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.12.247

[4] Cervantes, D., Carbajal, J., Celis, C., Aldana, D., “Estimation of hydrogen production potential from renewable resources in northern Peru”. *International Journal of Hydrogen Energy*. *B (50). 186-198.* 2023. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.350

[5] Qusay, H., Sameer, A., Marek, J., Ali, K., Tariq J., Bashar, M., Patrik, V., Monika, F., Muhammad, A., Hayder, M., Aws, Z., “Hydrogen role in energy transition: A comparative review”. *Process Safety and Environmental Protection. 1(184).* 1069-1093. 2020. https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.02.030

[6] Yuan, Ziyi & Tang, Jiali & Chen, Danlin & Li, Yang & Hong, Zihao & He, Xuezhong. “Membranes for Hydrogen Rainbow toward Industrial Decarbonization: Status, Challenges and Perspectives from Materials to Processes”. *Chemical Engineering Journal*. 2023, 144328. 10.1016/j.cej.2023.144328.

[7] Beschkov, Venko, and Evgeniy Ganev. “Perspectives on the Development of Technologies for Hydrogen as a Carrier of Sustainable Energy." *Energies* 16.17: 6108, 2023.

[8] Zhang, Jun & dechao, Wang & Chen, Rong & Zhu, Xun & Ye, Dingding & Yang, Yang & Liao, Qiang. “Insight into synergistic enhancement of photothermal catalytic hydrogen production by plasmonic Au-NP/TiO2 in the presence of glycerol”. Energy Conversion and Management, 2023. 277. 116626. 10.1016/j.enconman.2022.116626.

[9] Andriani, Dindha & Bicer, Yusuf. “A Review of Hydrogen Production from Onboard Ammonia Decomposition: Maritime Applications of Concentrated Solar Energy and Boil-Off Gas Recovery”, 2023. Fuel. 352. 128900. 10.1016/j.fuel.2023.128900.

[10] Kirchem, Dana, and Wolf-Peter Schill. “Power sector effects of green hydrogen production in Germany”. *Energy Policy* 182: 113738. 2023.

[11] Costa, T., Monteiro, A., Vicente, J., Vasconcelos, A., & Malveira, M. “Survey of Technical-Economic Perspectives and Challenges for the Green Hydrogen Market in Brazil”. *In 2023 15th IEEE International Conference on Industry Applications” (INDUSCON)* (pp. 372-377). IEEE. Nov 2023.

[12] Nikhil, P., Prakash, G. B., Kavyasri, K., & Sivasankar, P. “Analysis on CO2 emissions, green hydrogen requirement and geo-storage potential of hydrogen for decarbonization of industrial operations in southeastern coast of India”. *International Journal of Hydrogen Energy*, *52*, 1507-1521. 2024.

[13] Kunskaja, Svetlana & Bauer, Johannes & Budzyński, Artur & Jitea, Ilie. “A research analysis: the implementation of innovative energy technologies and their alignment with SDG 12. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies”. 5. 6-25, 2023. 10.15587/1729-4061.2023.288396.

[14] Cai, D., Acen, C., Hu, Y., Adedeji, M., Dagbasi, M., Staffell, I., & Bamisile, O. “Cost and thermodynamic analysis of wind-hydrogen production via multi-energy systems”. *Energy Conversion and Management*, *306*, 118286. 2024.

[15] Lee, Wang & Yoon, Chang-Kyu & Park, Hyunseo & Park, Ga-Hee & Jeong, Jae Hwan & Cha, Gi & Lee, Byoung-Hoon & Lee, Juri & Lee, Chan & Bootharaju, Megalamane & Sunwoo, Sung-Hyuk & Ryu, Jaeyune & Lee, Changha & Cho, Yong-Joon & Nam, Tae-Wook & Ahn, Kyung & Hyeon, Taeghwan & Seok, Yeong-Jae & Kim, Dae-Hyeong. “Highly Efficient Nitrogen-Fixing Microbial Hydrogel Device for Sustainable Solar Hydrogen Production”. *Advanced Materials*. 2023. 35. 10.1002/adma.202306092.

[16]Dankwa Ampah, Jeffrey & Afrane, Sandylove & Li, Bowen & Adun, Humphrey & Agyekum, Ephraim & Yusuf, Abdulfatah & Bamisile, Olusola & Liu, Haifeng. “The overarching role of electric vehicles, power-to-hydrogen, and pumped hydro storage technologies in maximizing renewable energy integration and power generation in Sub-Saharan Africa”. *The Journal of Energy Storage*. 2023. 67. 107602. 10.1016/j.est.2023.107602.

[17] F. Mendoza, Joan Manuel & Ibarra, Dorleta. “Technology-enabled circular business models for the hybridisation of wind farms: Integrated wind and solar energy, power-to-gas and power-to-liquid systems”. *Sustainable Production and Consumption*. 2023, 36. 308-327. 10.1016/j.spc.2023.01.011.

[18] Kamil, Kehinde & Samuel, Bassey & Khan, Umar. “Green hydrogen production from photovoltaic power station as a road map to climate change mitigation”. *Clean Energy*. 2024. 8. 156-167. 10.1093/ce/zkae020.

[19] Ahmadnejad, Alireza & Ebrahimi, Armin & Ghorbani, Bahram. “Pinch and exergy assessment of an innovative hydroge, and methane purification process configuration based on solar renewable energy”. 2024. Fuel. 359. 130391. 10.1016/j.fuel.2023.130391.

[20] Orjuela-Abril, Sofia & Torregroza Espinosa, Ana & Duarte-Forero, Jorge. “Innovative Technology Strategies for the Sustainable Development of Self-Produced Energy in the Colombian Industry”. *Sustainability*. 2023. 15. 5720. 10.3390/su15075720.

[21] Karabuga, A., Yakut, M. Z., & Utlu, Z. “Energy and exergy analysis of waste heat and solar energy assisted for hydrogen production system: A case study”. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024.

[22] Zheng, T., Li, A., Han, J., & Wang, X. F. “Biohybrid Molecule-Based Photocatalysts for Water Splitting Hydrogen Evolution”. *ChemPlusChem*, *88*(2), e202200424. 2023.

[23] Garud, Sushant & Tsang, Fanlok & Karimi, Iftekhar & Farooq, Shamsuzzaman. “Green hydrogen from solar power for decarbonization: What will it cost”. *Energy Conversion and Management*, 2023. 286. 117059. 10.1016/j.enconman.2023.117059.

[24] Wang, Changlong & Walsh, Stuart & Weng, Zhehan & Haynes, Marcus & Feitz, Andrew & Summerfield, Daisy. “Green steel: Synergies between the Australian iron ore industry and the production of green hydrogen”. *International Journal of Hydrogen Energy.* 48. 2023. 10.1016/j.ijhydene.2023.05.041.

[25] Wang, Y., Wang, T., Arandiyan, H., Song, G., Sun, H., Sabri, Y., ... & Kawi, S. “Advancing Catalysts by Stacking Fault Defects for Enhanced Hydrogen Production: A Review”. *Advanced Materials*, 2313378, 2024.

[26] Machado, Hugo & Ferreira, Ana & Teixeira, Senhorinha & Teixeira, José. “Green Hydrogen Value Chain: Modelling of a PV Power Plant Integrated with H2 Production for Industry Application”. *Energies.* 17. 2024. 1414. 10.3390/en17061414.

[27] Hu, Linlong & Yan, Gongxing & Chauhan, Bhupendra Singh & Elbadawy, Ibrahim & Abouelela, Mohamed & Marefati, Mohammad & Salah, Bashir. “Development and evaluation of an electro-Fenton-based integrated hydrogen production and wastewater treatment plant coupled with the solar and electrodialysis units”. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023. 177. 10.1016/j.psep.2023.06.072.

[28] Mati, A., Ademollo, A., & Carcasci, C. “Assessment of paper industry decarbonization potential via hydrogen in a multi-energy system scenario: A case study”. *Smart Energy*, *11*, 100114. 2023.

[29] Temiz, Mert & Dincer, Ibrahim. “A Unique Bifacial PV and Hydrogen-Based Cleaner Energy System with Heat Recovery for Data Centers”. *Applied Thermal Engineering*, 2022. 206. 118102. 10.1016/j.applthermaleng.2022.118102.

[30] Seck, Gondia & Hache, Emmanuel & Sabathier, Jerome & Guedes, Fernanda & Reigstad, Gunhild & Straus, Julian & Wolfgang, Ove & Ouassou, Jabir & Askeland, Magnus & Hjorth, Ida & Skjelbred, Hans & Andersson, Leif & Douguet, Sebastien & Villavicencio, Manuel & Trüby, Johannes & Brauer, Johannes & Cabot, Clement. “Hydrogen and the Decarbonization of the Energy System in Europe in 2050: A Detailed Model-Based Analysis”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 167. 2022. 112779. 10.1016/j.rser.2022.112779.

[31] AlZohbi, G. “Green Hydrogen Generation: Recent Advances and Challenges”. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. 1050. 012003. 10.1088/1755-1315/1050/1/012003.

[32] Gerloff, Niklas. “Comparative Life-Cycle-Assessment analysis of three major water electrolysis technologies while applying various energy scenarios for a greener hydrogen production”. *The Journal of Energy Storage.* 2021. 43. 102759. 10.1016/j.est.2021.102759.

[33] Svyatchenko, A.V. & Shaikhiev, I. & Sverguzova, s.V. & Fomina, Ekaterina. “Using Leaves and Needles of Trees as Sorption Materials for the Extraction of Oil and Petroleum Products from Solid and Water Surfaces”. 2021. 10.1007/978-3-030-75182-1_40.

[34] Ginsberg, Michael & Zhang, Zhuoran & Atia, Adam & Venkatraman, Maya & Esposito, Daniel & Fthenakis, Vasilis. “Integrating Solar Energy, Desalination and Electrolysis”. *Solar RRL*. 6. 2021. 10.1002/solr.202100732.

[35] Neupane, B., Bhattarai, S., Shah, A. K., & Thapa, B. S. “Green Ammonia as a flexible hydro-electricity carrier for Nepal”. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1037, No. 1, p. 012061). IOP Publishing. Jun 2022.

[36] Bhandari, R. “Green hydrogen production potential in West Africa–Case of Niger. *Renewable Energy”, 196*, 800-811. 2022.

[37] Gondal, Irfan. “Microbial Electrolysis cells and power-to-gas technology – A novel onsite industrial wastewater treatment and CCU arrangement”. *Water and Environment Journal*. 35. 10.1111/wej.12721. 2021.

[38] Obregon, L., Valencia, G., & Duarte, J. “Study on the applicability of sustainable development policies in electricity generation systems in Colombia”. *International Journal of Energy Economics and Policy*, *9*(6), 492-502. 2019.

[39] Cloete, Schalk & Hirth, Lion. “Flexible power and hydrogen production: Finding synergy between CCS and variable renewables”. *Energy*. 2019. 192. 116671. 10.1016/j.energy.2019.116671.

[40] Ma, Baojun & Li, Dekang & Wang, Xiaoyan & Lin, Keying. “Molybdenum-Based Co-catalysts in Photocatalytic Hydrogen Production: Categories, Structures, and Roles”. *ChemSusChem*. 11. 2018. 10.1002/cssc.201801481.

[41] Schmidt, Matthias & Linder, Marc. “A Novel Thermochemical Long Term Storage Concept: Balance of Renewable Electricity and Heat Demand in Buildings”. Frontiers in Energy Research. 8. 2020. 10.3389/fenrg.2020.00137.

[42] Marques, Fabielle & Silva, Julio & Libardi, Cícero & Carvalho, Rael & Sequine, Gabriel & Valane, Gabriel. “Hydrogen production by photovoltaic-electrolysis using aqueous waste from ornamental stones industries”. *Renewable Energy*. 2020. 152. 10.1016/j.renene.2020.01.156.

[43] Acar, Canan, and Ibrahim Dincer. “Investigation of a novel photoelectrochemical hydrogen production system." *Chemical Engineering Science* 197. 74-86. 2019.

[44] Khan, Javed & Sayed, Murtaza & Shah, Noor & Khan, Sanaullah & Zhang, Yuxin & Boczkaj, Grzegorz & Khan, Hasan & Dionysiou, Dionysios. “Synthesis of Eosin modified TiO2 film with co-exposed {001} and {101} facets for photocatalytic degradation of para-aminobenzoic acid and solar H2 production”. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2019. 265. 118557. 10.1016/j.apcatb.2019.118557.

[45] M. J. Page, J. E. McKenzie, P. M. Bossuyt, I. Boutron, T. C. Hoffmann, C. D. Mulrow, ... & D. Moher. “The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews”. *Revista Española de Cardiología*, 74(9), 790-799. 2021. https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016