



Publicación Cuatrimestral. Vol. 8, No 2, Mayo/Agosto, 2023, Ecuador (p. 31-48). Edición continua

<https://revistas.utm.edu.ec/index.php/Basedelaciencia/index>

revista.bdlaciencia@utm.edu.ec

Universidad Técnica de Manabí

DOI: <https://doi.org/10.33936/revbasdelaciencia.v8i2.5906>

PERSPECTIVAS DEL HIDRÓGENO VERDE COMO UN VECTOR ENERGÉTICO DE FUTURO

Danilo Francisco Martínez Quiñonez 

Corporación Nacional de Electricidad. Unidad de Negocio Santa Elena, Ecuador. E-mail: pmarket1@hotmail.com

Recibido: 26-6-2023 / Aceptado: 16-8-2023 / Publicación: 31-8-2023

Editor Académico: Yulixis Nohemi Cano de Torres 

RESUMEN

El hidrógeno verde se considera un vector energético del futuro que puede apoyar el esfuerzo de descarbonización de las economías mundiales, a la vez que permitirá impulsar con eficacia la integración y el uso de energía de fuentes renovables. Es por ello, que el presente artículo tiene como objetivo analizar prospectivamente los argumentos que sustentan al hidrógeno verde como vector energético del futuro, desde aspectos técnicos, regulatorios, económicos y de modelos de desarrollo de mercado. Para tales efectos, se desarrolló una investigación de tipo documental interpretativa – comprensiva sobre varias fuentes de información, utilizándose los métodos de análisis y síntesis, de análisis estructural prospectivo, la inducción, la deducción y la revisión de documentos. Como resultado del análisis prospectivo realizado se identificaron un conjunto de tentativas sistemáticas y sus elementos y argumentos de reflexión estratégica, las cuales se configuran en las perspectivas del hidrógeno verde como vector energético de futuro.

Palabras clave: Hidrógeno, hidrógeno verde, vector energético, energías renovables, descarbonización.

PERSPECTIVES OF GREEN HYDROGEN AS AN ENERGY VECTOR FOR THE FUTURE ABSTRACT

Green Hydrogen is considered an energy vector for the future that can support the effort to decarbonize world's economies, while at the same time enabling the integration and use of energy from renewable sources to be effectively promoted. That is why this article aims to prospectively analyze the arguments that support Green Hydrogen as an energy vector of the future, from technical, regulatory, and economic aspects and market development models. For such purposes, interpretative-comprehensive documentary research was developed on various sources of information, using the methods of analysis and synthesis, prospective structural analysis, induction, deduction, and document review. As a result of the prospective analysis carried out, a set of systematic attempts and their elements and arguments for strategic reflection were identified, which are configured in the perspectives of Green Hydrogen as an energy vector for the future.

Keywords: Hydrogen, green hydrogen, energy vector, renewable energy, decarbonisation.

PERSPECTIVAS DO HIDROGÊNIO VERDE COMO VETOR DE ENERGIA DO FUTURO

RESUMO

O hidrogénio verde é considerado um vetor energético do futuro que pode apoiar o esforço de descarbonização das economias mundiais, ao mesmo tempo que permite promover eficazmente a integração e utilização de energia proveniente de fontes renováveis. É por isso que este artigo pretende analisar prospectivamente os argumentos que sustentam o hidrogénio verde como vetor energético do futuro, desde aspectos técnicos, regulatórios, económicos e modelos de desenvolvimento de mercado. Para isso, foi desenvolvida uma pesquisa documental interpretativo-compreensiva e abrangente sobre diversas fontes de informação, utilizando os métodos de análise e síntese, análise estrutural prospectiva, indução, dedução e revisão documental. Como resultado da análise prospetiva realizada, foi identificado um conjunto de tentativas sistemáticas e respetivos elementos e argumentos de reflexão estratégica, que se configuram nas perspetivas do hidrogénio verde como vetor energético para o futuro.

Palavras-chave: Hidrogénio, hidrogénio verde, vetor energético, energias renováveis, descarbonização

Citación sugerida: Martínez, D. (2023). INCRUSTACIONES EN LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE. FORMACIÓN Y MÉTODOS DE INHIBICCIÓN. Revista Bases de la Ciencia, 8(2), 31-48. DOI: <https://doi.org/10.33936/revbasdelaciencia.v8i2.5906>





1. INTRODUCCIÓN

Las energías renovables son fuentes limpias sin emisiones contaminantes, inagotables y crecientemente competitivas. Se diferencian de los combustibles fósiles por su diversidad, abundancia y potencial de aprovechamiento, pero, sobre todo, en que no producen gases de efecto invernadero (GEI). El crecimiento de las energías renovables es constante y prospectivo, como se refleja en las estadísticas anuales de la Agencia Internacional de la Energía (IEA, por sus siglas en inglés); según las previsiones de la IEA (2021), la participación de las energías renovables en el suministro eléctrico global pasará del 26% en 2018 al 44% en 2040, y proporcionarán dos tercios del incremento de demanda eléctrica registrado en ese período, principalmente a través de las tecnologías eólica y fotovoltaica.

En tal sentido, se proyectan alternativas a mediano y largo plazo, sobre todo para alcanzar la descarbonización de la economía a partir de la generación de energía, las tecnologías de almacenamiento y las estrategias que se consideran “verdes y limpias”. Dentro de estas perspectivas se encuentra el hidrógeno verde, el cual, se produce a través de energías renovables y puede ofrecer alternativas solventes en los sectores de difícil electrificación. Cabe resaltar además, que el hidrógeno verde es un vector energético que permite aprovechar en mayor medida las energías renovables en el proceso de transición energética, lo que conduce a sistemas libre de emisiones contaminantes.

Desde estas perspectivas tecnológicas, el hidrógeno verde se considera un vector energético del futuro que puede apoyar el esfuerzo de descarbonización, como un importante recurso que se utiliza en la industria y para generar electricidad. En particular, el hidrógeno verde como medio de almacenamiento puede impulsar con eficacia la integración y el uso de energía de fuentes renovables como la eólica y la solar para una transición energética ecológica. Sin duda, una solución a los problemas de almacenamiento de energía y medio ambientales está dada por la implicación del hidrógeno verde, considerado como un vector energético, debido a que puede proporcionar gran capacidad de energía por unidad de masa, cuando es combinado en presencia de oxígeno, utilizando ciclos térmicos o procesos electroquímicos, con el objetivo de generar electricidad, calor y agua (Fúnez y Reyes, 2019).

Tales consideraciones abalan las tendencias que indican al hidrógeno verde como uno de los combustibles más convenientes para mejorar la eficiencia energética y la conservación del medio ambiente, teniendo en cuenta que puede obtenerse de múltiples formas y a partir de fuentes muy diversas, lo que supone una gestión versátil y descentralizada. Sin embargo, la generalización del uso del hidrógeno verde enfrenta grandes retos, dentro de los que está el relacionado al desarrollo de infraestructuras requerido para posibilitar su almacenamiento y distribución a gran escala. Por lo que, la aplicación a la que se destine su producción conlleva la elección de alternativas óptimas para su almacenamiento y transporte, desde estos factores MITERD (2020), argumenta lo siguiente:

Para determinar cuál es la opción óptima para su transporte y almacenamiento, deben tenerse en cuenta diversos factores, tales como el caudal producido y caudal de consumo en cada punto (Nm^3/h), distancia desde planta de producción hasta punto o puntos de consumo, complementariedad de usos finales, idoneidad para el acondicionamiento final y uso en los diferentes tipos de consumos. (p.15)

En tal sentido, hay factores pendientes por resolver para una utilización rentable del hidrógeno verde, los cuales se fundamentan en aspectos técnicos desde la necesidad de desarrollar tecnologías cada vez más eficientes para hacer sostenible y competitiva las etapas de su cadena de valor; mientras que, otros son de carácter marcadamente ideológico o de modelos de desarrollo de ecosistemas sostenibles desde un punto de vista social y ambiental; además, de las implicaciones regulatorias que engloban aspectos de certificaciones, obtención de permisos y estandarización. A todo lo cual, se adiciona el desarrollo de infraestructuras necesarias y cadena de valor habilitante asociados a los costos de su eventual implantación.

Estas problemáticas suscitan algunas dudas sobre el hidrógeno y sus variantes, como un vector energético de futuro. Es por ello, que en el presente artículo se persigue como objetivo un análisis prospectivo de los argumentos que sustentan al hidrógeno verde como vector energético, desde aspectos técnicos, regulatorios, económicos y de modelos de desarrollo de mercado, que se constituyen en tentativas sistemáticas de reflexión estratégica.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Atendiendo a la problemática que se aborda y para el alcance del objetivo propuesto, se desarrolló una investigación de tipo documental, en la que se asumió el propósito de realizar un análisis prospectivo sobre los factores y argumentos que propician o desestimulan las perspectivas del hidrógeno verde como vector energético, desde diferentes reflexiones estratégicas:



potencialidades aprovechables de las energías renovables; desarrollo tecnológico y de investigaciones científicas; costos asociados con su implantación; marcos regulatorios como barreras a superar; y las acciones de promoción de la conveniencia del hidrógeno verde, atendiendo a los pilares fundamentales de uso: su producción mediante fuentes renovables, su almacenamiento mediante diferentes métodos y, finalmente, su combustión.

De este modo, se realizó un trazado por las estrategias para el desarrollo gradual de la cadena de valor del hidrógeno, que permite identificar sus principales desafíos medioambientales, técnicos y regulatorios; así como, valorar la curva de aprendizaje tecnológica y de costes, siendo objetivos sobre la competitividad real del hidrógeno verde como vector energético.

La investigación desarrollada manifiesta un carácter cualitativo, centrada en la interpretación, comprensión y explicación de varias fuentes de información: artículos publicados en revistas científicas especializadas, memorias de eventos científicos, documentos oficiales y páginas web de organizaciones relacionadas con las energías renovables y los procesos de obtención, producción, almacenamiento, transporte y uso del hidrógeno verde como vector energético. Para ello resultaron de utilidad los métodos de análisis y síntesis, de análisis estructural prospectivo, la inducción, la deducción y la revisión de documentos. Lo cual permitió obtener una información primaria, de cuya clasificación, interpretación y análisis prospectivo, se deriva un conocimiento de reflexión estratégica sobre el uso del hidrógeno verde como vector energético y sus principales desafíos; de ahí, que el hecho de adoptar la perspectiva cualitativa no es para eludir el manejo de datos cuantitativos, sino porque el interés es de carácter interpretativo y comprensivo para captar exhaustivamente lo que dicen las fuentes consultadas y orientar la lógica de construcción del conocimiento en este sentido.

La presente investigación somete a un análisis crítico un grupo de fuentes documentales teóricas y prácticas, publicadas con anterioridad, para una vez interpretadas y comprendidas, contextualizar los saberes que emergen de ellas, sin pretender presentar un estado del arte de la investigación científica y tecnológica sobre el hidrógeno verde como producto energético, lo cual, está fuera del alcance de este trabajo, sino analizar prospectivamente las condiciones y situaciones que favorecerían o no, las perspectivas del hidrógeno verde como vector energético del futuro a partir de la implicación de las energías renovables, las tecnologías, los procesos investigación -

innovación, los mercados a nivel global, las proyecciones económica y las políticas y marcos regulatorios como argumentos de reflexión estratégica.

3. RESULTADOS

El hidrógeno como vector energético tiene más de cinco décadas de investigación y desarrollo. En los últimos años como se expone en BloombergNef (2018), se ha posicionado como una alternativa viable y una prioridad en la agenda energética de muchos países debido a su potencial de descarbonización, al desarrollo tecnológico y a la disminución acelerada de los costos de infraestructura. En consecuencia, para identificar las fuentes de energías, las tecnologías de producción y emisiones de GEI relacionadas con la producción de hidrógeno, se ha asignado una escala de “colores”, siendo el hidrógeno verde (energía renovable) el más limpio y el más buscado para alcanzar los objetivos de mitigación del cambio climático.

En correspondencia, durante los últimos cinco años el interés por las tecnologías de hidrógeno ha crecido exponencialmente. Desde septiembre de 2020, más de 19 países del mundo ya tienen una hoja de ruta para desarrollar el hidrógeno verde. Algunos de ellos incluyen planes de cooperación internacional para la futura creación de mercados mundiales. En tanto, tal como refiere Brijaldo et al. (2021) otros países están preparando estrategias prospectivas, al tiempo que promueven proyectos piloto para generar capacidades económicas, técnicas y regulatorias, y establecer el mercado.

Dentro de este marco, cuando se habla de hidrógeno verde se hace referencia al que es obtenido sin generar emisiones contaminantes, de forma sostenible mediante energías renovables. Considerándose, como un combustible que ya se ha postulado como un vector energético clave para cumplir con los compromisos marcados para 2050 en la lucha contra el cambio climático. Por lo tanto, el hidrógeno verde será un vector energético del futuro en la ya inminente transición energética que las economías mundiales están obligadas a liderar para lograr la neutralidad en carbono y para la sustitución de combustibles fósiles.

Por otra parte, se ha constatado el potencial del hidrógeno verde desde su gran valor en la mitigación del cambio climático, debido a su capacidad para sustituir a los combustibles fósiles en aquellos sectores y usos que hasta ahora eran más difíciles de descarbonizar, además de sus condiciones como sistema de almacenamiento de energía. Visto de esta forma, se significa que al ser producido a partir de energía renovable, es el vector energético más adecuado para una transición energética totalmente sostenible. En este sentido, de acuerdo con Schneider (2021), “el hidrógeno es visto como un recurso con la capacidad de promover el acoplamiento de los mercados de combustible, eléctricos, industriales y otros” (p. 10).



Tales consideraciones referencian el potencial del hidrógeno verde como vector energético, para dar solución a los grandes desafíos que proponen los procesos de transición energética y para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS); determinándose que, “permite la integración sectorial, ofreciendo una alternativa limpia, sostenible y flexible para convertir energía eléctrica renovable en un portador de energía química para su uso en movilidad, energía y aplicaciones industriales de alta demanda” (Asociación Peruana de Hidrógeno, 2021, p. 2). En correspondencia con lo anterior, la Universidad Católica del Uruguay (2022) identifica como potencialidades del hidrógeno verde las siguientes:

- Permite la descarbonización de sectores de alto impacto como transporte e industria difícil de electrificar.
- Aporta capacidad de almacenamiento de gran magnitud y larga duración para la creciente integración de energía renovable no convencional.
- Permite viabilizar el acoplamiento regional, facilitando el transporte de energía entre países, aprovechando las ventajas de las potencialidades de generación de algunos países con las altas demandas de otros.
- Actualmente presenta una tendencia a baja de costo de producción por aumento de escala de electrolizadores (se proyecta para 2030 una reducción de costos en la generación de hidrógeno del 50% (IEA, The Future of Hydrogen: Seizing today’s opportunities, 2019)), lo cual se combina con la mantenida proyección de bajo costo de electricidad renovable. (p. 2)

A pesar de estas potencialidades, el hidrógeno verde aún no forma parte del tejido energético en muchas regiones a causa de algunas dificultades que la investigación, las políticas gubernamentales o las inversiones privadas tienen el reto de superar, considerando que:

- El hidrógeno verde en la actualidad es más caro de producir que el gris. Sin embargo, la caída del precio de las energías renovables ha derivado en nuevas oportunidades para que su coste sea cada vez más competitivo. Significándose, que la producción de la electricidad solar es 10 veces más barata que hace una década y la energía eólica cuesta

menos de la mitad, todo lo cual, posibilita que la electricidad necesaria para los procesos de electrólisis disminuya su precio.

- Su implantación requiere de importantes inversiones. Se habla de que harán falta 300.000 millones de dólares en los próximos años a nivel mundial para infraestructuras e investigación. Enfatizándose la necesidad de políticas para su desarrollo, teniendo en cuenta que la demanda de hidrógeno verde puede aumentar hasta los 700 millones de toneladas para el 2050 de acuerdo con BloombergNEF (2021, como se citó en IRENA, 2022); de ahí que, la inversión para su desarrollo es de un coste elevado, pero también una oportunidad financiera.

Más allá de estas dificultades, el hidrógeno verde es considerado como un vector energético de futuro, debido a que por sus características, puede emplearse en casi todos los sectores que hoy en día dependen de los combustibles fósiles y son difíciles de descarbonizar, todo lo cual, es una afirmación que ha ido alcanzando un mayor consenso (Lambert, 2020). En consecuencia, se considera que el hidrógeno verde es un vector energético, que puede utilizarse para almacenar, transportar y transformar energía para lograr la descarbonización de nuestros sistemas energéticos y, de esta manera, poder cumplir los objetivos climáticos del Acuerdo de París y así detener el avance del cambio climático.

En lo que se refiere a métodos de producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables, y ligado a la implantación masiva de plantas de generación de energía renovable que se están implementando a nivel mundial (instalaciones solares, eólicas, hidráulicas, mareomotrices, entre otras), la electrólisis del agua es el método de producción más adecuado y el que más interés está despertando por parte de las industrias y las administraciones de los diferentes países a nivel mundial; en esta alternativa de obtención de hidrógeno, se utiliza electricidad necesaria para separar los gases hidrógeno y oxígeno de la molécula de agua. Es una técnica llamativa en cuanto a la disminución de gases contaminantes para la producción de energía limpia, la cual, se expresa mediante la **ecuación 1**. De este modo, el proceso tiene lugar en presencia de dos electrodos, expuesto a una diferencia de potencial en una solución acuosa, donde, en el cátodo se da la formación del hidrogeno de acuerdo con la **ecuación 2** y en el ánodo el oxígeno según la **ecuación 3**:



La electrólisis es un proceso electroquímico por el cual, a partir de electricidad, se obtiene hidrógeno y oxígeno a través de la descomposición de la molécula de agua, tal como se representa

en la **Figura 1**. Observándose además, que la producción de hidrógeno en los electrolizadores se relaciona con la densidad de corriente eléctrica, definida como la cantidad de corriente dividida por el área de electrodo. En este orden, Aguado et al. (2021) refiere que:

En general, cuanto mayor sea la densidad de corriente, mayor será la tensión de alimentación requerida y el coste energético por unidad de masa de hidrógeno producido. Sin embargo, tensiones más altas reducen el tamaño y coste de capital total del electrolizador. Los electrolizadores de última generación son fiables, tienen rendimientos energéticos de un 65–80% y operan a densidades de corriente de aproximadamente 2000 A/m². (p. 84)

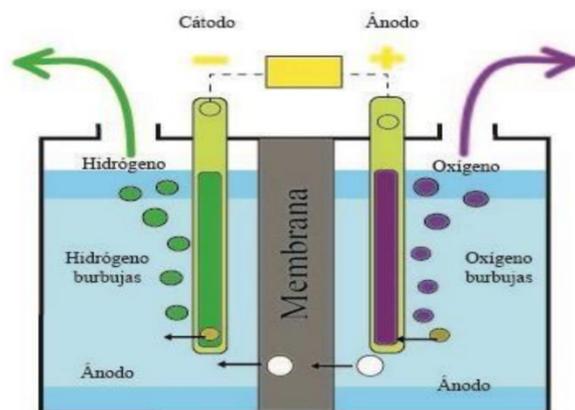


Figura 1. Gráfico relacionado con el principio de funcionamiento de un proceso de electrólisis.

Fuente: Evaluación técnica y económica del uso de hidrógeno verde en aplicaciones para la industria y desplazamiento de combustible fósil (Jiménez, 2020).

De esta forma, la electrólisis permite la producción de hidrógeno de manera limpia, siempre y cuando la energía que se utilice para el proceso provenga de fuentes renovables; en este orden, según Rashid et al. (2015) la utilización de energía solar e hidráulica son métodos sostenibles para la producción de hidrógeno de alta pureza mediante un proceso libre de contaminación y la explotación de recursos renovables. Su importancia generalizada frente al resto de tecnologías de producción de hidrógeno renovables, se debe principalmente a:

- Utiliza electricidad como fuente primaria para la ruptura de la molécula de agua, disponiendo de una gran flexibilidad para ser integrada con las distintas instalaciones de producción de energías renovables.

- El hidrógeno producido es de alta pureza y apto para el uso en todas las aplicaciones, incluidas las de pilas de combustible.
- La electrólisis tiene la capacidad de operar en cargas parciales y variar la carga de forma muy rápida, lo que ofrece una gran flexibilidad para acoplarse con las instalaciones de producción de energías renovables.
- Los electrolizadores están compuestos de sistemas modulares que permiten su fácil escalado desde bajas hacia altas potencias, por lo que puede ser utilizado tanto para producción centralizada como descentralizada.
- Posibilidad de un sistema de almacenamiento de energía en forma de hidrógeno, permitiendo la gestión óptima de micro redes y redes inteligentes.
- Se trata de una tecnología disponible en el mercado con costos aceptables y eficiencias mayores que el resto de las tecnologías en desarrollo.

Estas perspectivas tecnológicas estratégicas sobre el hidrógeno verde, ayudarán a resolver los problemas de almacenamiento y transporte de energía que en el futuro tendrá el uso masivo de renovables, pero además durante un periodo de transición permitirá un uso más eficiente y menos contaminante de los combustibles fósiles. En este orden, los estudios sugieren que el uso del hidrógeno verde puede reducir las emisiones de contaminantes atmosféricos como el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitrógeno (NO_x), el óxido de azufre (SO_x), entre otros, provenientes en lo fundamental de sectores económicos como el transporte y la industria, contribuyendo a mitigar la contaminación global del medio ambiente.

Así, el hidrógeno verde como vector energético permite un acoplamiento con el sector eléctrico, proporcionando una flexibilidad adicional para integrar la energía renovable con generación variable y proporcionando una alternativa para el almacenamiento estacional de energía y la provisión de capacidad adecuada. No obstante, al menos hasta la fecha, el hidrógeno verde no resulta competitivo en cuanto a costes comparado con el gris, una situación con visos de cambiar si tenemos en cuenta la disminución progresiva en los precios de las energías renovables y los recientes avances tecnológicos en materia de electrolizadores. Por lo tanto, con la innovación tecnológica para mejorar el rendimiento de los procesos de obtención de hidrógeno verde, el despliegue de economías de escala, las plantas de electrolizadores más grandes y la ya mencionada disminución continua del precio de la energía renovable, que es el principal factor de coste; se espera de acuerdo con Fernández et al. (2021), que el hidrógeno verde alcance la paridad



de valores con el que se deriva de fuentes fósiles durante la próxima década, como una perspectiva de futuro.

Atendiendo a todo lo expuesto anteriormente, la gran incógnita en la actualidad lo constituye la disyuntiva de hasta qué punto crecerán tanto la industria del hidrógeno verde como las perspectivas de su competitividad como vector energético, para cubrir un porcentaje relevante de la demanda final de energía, fundamentalmente en la electricidad, más allá de los usos actuales en determinados sectores en un futuro inmediato.

4. DISCUSIÓN

Como parte del objetivo de este artículo se revisan las perspectivas del hidrógeno verde como un vector energético, desde un análisis prospectivo de acuerdo con Jaso (2021), que permite determinar un conjunto de tentativas sistemáticas de reflexión estratégica para delimitar las perspectivas de horizonte; las cuales, configuran las perspectivas estratégicas, la toma de decisiones y la reducción de incertidumbre, sobre el desarrollo futuro de una industria y una cadena de valor del hidrógeno verde como vector energético con protagonismo en la matriz energética del futuro, donde se aprovechen las oportunidades tecnológicas e industriales y de generación de valor añadido, que supone el proceso de descarbonización de la economía mediante el empleo de las energías renovables.

En el análisis prospectivo sobre el hidrógeno verde, se determinan y combinan diferentes tentativas sistemáticas de reflexión acción, sobre la base de potenciales teóricos, técnicos, económicos y de mercado (McKenna et al., 2022). De esta manera, se parte de un potencial de tendencias teóricas que se van reduciendo progresivamente al incorporar tentativas de restricciones técnicas, regulatorias, económicas y de mercados. Estos argumentos, permiten un análisis descriptivo sobre el entorno del hidrógeno verde como sistema, donde se identifican los factores claves y posibles escenarios de articulación de acciones estratégicas pertinentes que configuran sus perspectivas como vector energético del futuro.

Dentro de este orden de ideas, el análisis prospectivo se establece desde las incertidumbres que se describen en la literatura científica, como los retos a los que se enfrenta la industria del hidrógeno verde de cara al futuro, independientemente de acciones políticas que suponen estrategias, iniciativas y la disponibilidad prevista de nuevos flujos de financiación para

actividades de investigación e innovación en el desarrollo de nuevas soluciones tecnológicas; a partir de las cuales, se proyecta el uso del hidrógeno verde en las matrices energéticas a muy largo plazo. En este orden, la implicación del hidrógeno verde como vector energético se significa en pronósticos reservados o en políticas reactivas, condicionadas por la cadena de valor agregado y las características de los usos finales de la energía, así como, por retos medioambientales, técnicos, económicos y regulatorios (Martén y Fernández, 2022).

Cabe resaltar, que en la implantación de políticas y estrategias actuales sobre los escenarios para el desarrollo del hidrógeno verde como vector energético, su despliegue masivo y la aceptación de distintos usos finales de la energía, se identifican restricciones relevantes; entre las cuales, se incluyen de acuerdo con la Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA, 2020): (1) elevados costes de producción; (2) la inexistencia de infraestructuras dedicadas; (3) la baja eficiencia en los procesos de conversión y operación necesarios para utilizar hidrógeno; (4) la falta de reconocimiento y visibilidad del valor del hidrógeno renovable en los marcos regulatorios y en las políticas energéticas; y (5) el hecho de que en la actualidad solo la utilización de electricidad de origen renovable (y no la electricidad que se suministra de las redes eléctricas) garantiza la producción de hidrógeno verde.

Derivado del análisis de las restricciones abordadas, así como de los retos a los que se enfrenta la industria del hidrógeno verde y sus potencialidades que han modificado en los últimos años la visión sobre su papel en el sector energético y su cadena de valor, podemos delimitar los escenarios y variables claves de la prospectiva del hidrógeno verde como vector energético; en tal sentido, se configuran los sistemas de relaciones de condicionamiento y dependencia entre las tentativas sistemáticas identificadas, atendiendo a los factores claves que permiten reducir riesgos e incertidumbres, además de la reflexión estratégica sobre la puesta en marcha del sistema de hidrógeno verde como vector energético, que significan su protagonismo en la matriz energética del futuro y el aprovechamiento de las oportunidades tecnológicas e industriales y de generación de valor añadido.

Estas oportunidades como variables claves, condicionan desde sus relaciones los escenarios prospectivos del hidrógeno verde, dado que en su interrelación se describen factores y escenarios de oportunidades, los cuales se constituyen en perspectivas de horizontes de futuros posibles del hidrógeno verde como vector energético. Las variables claves se conforman desde las tentativas sistemáticas identificadas, donde las potencialidades teóricas de los recursos de energías renovables se transforman en hidrógeno verde. Estas potencialidades teóricas están condicionadas



por las tentativas sistemáticas: técnicas, regulatorias y de mercado, así como las económicas en su interrelación de condicionamiento y de dependencias con las tentativas antes relacionadas.

Por consiguiente, en la delimitación de la prospectiva del sistema de hidrógeno verde como vector energético, las tentativas sistemáticas técnicas y regulatorias condicionan los escenarios que estructuran sus hojas de rutas en la actualidad; teniendo en cuenta, que se impulsa el desarrollo de nuevas tecnologías y procesos basados en el hidrógeno y en el desarrollo de soluciones de captura, almacenamiento y uso de CO₂, además del fomento de la producción de hidrógeno verde mediante regulaciones y medidas fiscales.

Las tentativas técnicas tienen en cuenta aspectos tecnológicos y se definen como el contenido energético del hidrógeno verde, que pueden producirse realmente mediante electrólisis alimentada por energías renovables; en el desarrollo de estas tentativas, se configuran y condicionan escenarios: regulatorios, económicos y de mercado. En lo fundamental, se puede significar que el desarrollo de las tecnologías de electrólisis atendiendo a la disminución de sus costes, sus niveles altos de eficiencia y su variedad tecnológica: Alcalina, Ácida (PEM) y Óxido Sólido (SOEC), condicionan y determinan la eficiencia como vector energético del hidrógeno verde y conllevan a su crecimiento; en este sentido, la reflexión prospectiva se enmarca en que la producción del mismo requiere una gran cantidad de electricidad renovable (Muñoz et al., 2022), por lo que la disminución de los precios de la electricidad verde y el aumento de su producción por el desarrollo y avances de las tecnologías productoras de energías renovables (fotovoltaicas y eólicas), se convierten en variables claves intervinientes. Estas variables, se consideran factores relevantes para analizar las perspectivas del aumento de la competitividad de los importes de producción del hidrógeno verde y su cadena de valor añadido; todo lo cual, conlleva a escenarios económicos de perspectivas con implicación desde las relaciones entre las inversiones y los gastos operativos de producción del hidrógeno verde, y su implicación específica como herramienta rentable hacia el futuro de la descarbonización de los sistemas energéticos.

Con respecto a las tentativas regulatorias, implican la estandarización del hidrógeno como producto energético y el desarrollo de normas específicas para la variante verde, además, contribuye al fomento de actividades de investigación e innovación y al despliegue de infraestructuras estratégicas para asegurar el impulso a la cadena de valor añadido. Estas tentativas sistemáticas, conforman marcos regulatorios específicos que dinamizan las fases

prospectivas y estratégicas del hidrógeno verde como vector energético, a corto, mediano y largo plazo, atendiendo a la integración de las tecnologías de producción de energía eléctrica a partir de su uso en el mercado de la electricidad. Los marcos regulatorios, son variables claves que normalizan la participación de las aplicaciones del hidrógeno verde como un portador de energía en los mercados y para el desarrollo de certificados que lo diferencian de otros.

Debe señalarse además, de acuerdo con organismos internacionales como IRENA (2020) las acciones de regulaciones estratégicas del escenario económico, donde se considera el efecto monetario y social de la reducción en las emisiones de carbono, para impulsar el desarrollo de los mercados del hidrógeno verde por varios factores: impuestos regulatorios a las emisiones de carbono, ya que su uso y consiguiente reducción en las emisiones puede llegar a traer grandes ventajas económicas respecto a otros combustibles, especialmente en un futuro con eventuales alzas en dicho impuesto; certificaciones de reducción de emisiones de carbono, que implican el cumplimiento de estándares nacionales o internacionales, que pueden permitir negociaciones y acuerdos muy beneficiosos económicamente; y la aceptación social desde la imagen pública institucional, abalada por certificaciones de cero emisiones que permiten la venta de productos con alto prestigio y acceso a mercados rentables.

Por consiguiente, las tentativas técnicas y regulatorias explicadas, permiten la observación a corto, mediano y largo plazo del futuro del hidrógeno verde como vector energético y del comportamiento de sus potencialidades, constituyéndose desde sus argumentos en perspectivas de futuro; donde se considera, la evolución y los condicionamientos de la economía y la sociedad, así como las políticas de desarrollo sostenibles. En consecuencia, la identificación de tendencias técnicas y regulatorias emergentes, permiten un proceso de reflexión que sustenta las perspectivas del hidrógeno verde como vector energético.

Las consideraciones antes expuestas, permiten comprender y explicar las interrelaciones entre las tentativas sistemáticas técnicas y las regulatorias con las económicas, de lo cual se deriva un proceso de reflexión prospectiva que permite sintetizar el escenario de las potencialidades económicas del hidrógeno verde, a partir de acciones estratégicas que singularizan el desarrollo tecnológico y los marcos regulatorios; todo lo cual, permite referenciar una perspectiva económica, identificando los argumentos esenciales que le determinan como una perspectiva de futuro a mediano y largo plazo. En tales características, las tentativas sistemáticas económicas se constituyen en una perspectiva del hidrógeno renovable en su horizonte, desde acciones estratégicas de anticipación que configuran factores claves que le permiten el crecimiento y competitividad como vector energético, a partir de la mejora continua de la eficiencia de los



procesos de conversión y en la disminución de los valores fijos de las infraestructuras, necesarios tal como explican Gandhi et al. (2022) para la integración pertinente con el sistema eléctrico y el de movilidad.

La perspectiva económica descrita como perspectiva de futuro, se proyecta desde la delimitación de variables claves, que significan el sentido del desarrollo de toda la cadena de valor (generación de electricidad renovable, producción, almacenamiento, transporte y distribución) del hidrógeno verde, desde la implicación de un proceso reflexivo gradual y continuo atendiendo a los siguientes argumentos: producción a partir de fuentes 100% renovables; descenso del valor de la generación de energías renovables y aumento de su producción escala; aumento progresivo de las capacidades de producción de los electrolizadores y de la eficiencia de sus tecnologías (Alcalina, Ácida (PEM) y Óxido Sólido (SOEC)), así como los costos de su construcción; disminución paulatina de los valores de la energía en el coste total de la producción; alianzas geográficas para el desarrollo como vector energético; el aumento de los procesos inversionista; y las tendencias al equilibrio en la relación entre el importe total del sistema (inversiones y los gastos operativos) y la producción. Todos estos argumentos, se configuran desde lo prospectivo estratégico en la perspectiva económica del hidrógeno verde como vector energético del futuro.

Teniendo en cuenta los elementos abordados con anterioridad, que se conforman en perspectivas sistemáticas identificadas y desde su interrelación reflexiva, se delimitan las tentativas de mercado. Estas, se proyectan como una perspectiva de futuro que significa el sentido del aumento de la demanda mundial en los próximos años del potencial del hidrógeno verde como vector energético y su uso en nuevas aplicaciones, que actualmente, se realizan en menor escala, pero que se masificarán en su uso como combustible y en el sector eléctrico como almacenamiento estacional o para abastecer de servicios complementarios al sistema; además, existe un amplio interés en las aplicaciones que no requieren gran inversión en infraestructura y que permiten posicionar al hidrógeno verde como fuente de energía alterna conectando a diversas industrias, que aumentarán aún más su demanda (IRENA, 2022). En consonancia, se implican factores claves que actúan en el desarrollo de la industria y el mercado del hidrógeno, entre los que se pueden incluir los siguientes: la aceleración en todo el planeta de las políticas y estrategias orientadas a reducir las emisiones de GEI en la economía; el valor decrecientes de las energías renovables y de las tecnologías de producción de hidrógeno; el lanzamiento de hojas de rutas nacionales para

el desarrollo del mercados; y las alianzas y movimientos estratégicos en el ámbito industrial de empresas clave en distintos sectores para posicionarse en el mercado.

En tal sentido, las tentativas de mercado se configuran en una perspectiva de futuro del hidrógeno verde como vector energético, que se refleja en las demandas de mercado y en las dinámicas del aumento de inversiones. De esta forma, los cambios regulatorios que acompañarán al despliegue de estrategias prospectivas de producción, integración de sistemas energéticos e industriales, para desarrollar la cadena de valor del hidrógeno verde, condicionan prospectivamente la demanda de mercado de este portador energético.

Todo lo antes expuesto, permite determinar que el análisis prospectivo realizado describe un proceso de reflexión estratégica sobre las perspectivas del hidrógeno verde como vector energético, donde se identifican tentativas sistemáticas: técnicas, regulatorias, económicas y de mercado, así como sus variables y factores claves, que posibilitan analizar escenarios potenciales y tendencias. Por otra parte, se delimitan argumentos y elementos que se configuran a partir de interrelaciones y condicionamientos, como prospectivas estratégicas del hidrógeno verde y sus perspectivas de horizonte.

5. CONCLUSIONES

El análisis prospectivo realizado permite arribar a las siguientes conclusiones:

El hidrógeno verde se posiciona como uno de los principales vectores de la transición energética a medio y largo plazo, debido a que su producción y consumo es neutral climáticamente y no genera emisiones de GEI; en tal sentido, su característica fundamental es que, aunque no es en sí una fuente energética, es un portador de energía como la electricidad. De este modo se complementa perfectamente a la electricidad para almacenar y transportar la energía, además, se prevé que el papel del mismo sea clave para gestionar la producción eléctrica, donde se incluyen aquellos usos que hasta ahora son difíciles de electrificar.

Se espera que el hidrógeno verde participe en las matrices energéticas a medio y largo plazo, lo cual conlleva retos medioambientales, técnicos, económicos y regulatorios, así como restricciones para su desarrollo, despliegue y adopción entre los distintos usos finales de la energía; en este orden, se incluyen: los elevados costes de producción; la inexistencia de infraestructuras dedicadas; la baja eficiencia en los procesos de conversión y operación necesarios; la falta de reconocimiento y visibilidad de valor agregado en los marcos regulatorios y en las políticas energéticas; y el hecho de que en la actualidad solo la utilización de electricidad de origen renovable garantiza su producción.



El análisis prospectivo realizado, permitió determinar un conjunto de tentativas sistemáticas: técnicas, regulatorias, económicas y de cuestiones de mercado, que se interrelacionan y condicionan; las cuales, describen elementos y argumentos de reflexión estratégica que se significan en escenarios potenciales y tendencias emergentes de una cadena de valor. Además, las interrelaciones y condicionamientos permiten comprender el sentido y significado de las variables claves de análisis prospectivo que explican y delimitan las tentativas que configuran las perspectivas del hidrógeno verde como vector energético del futuro.

6 DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERÉS DE LOS AUTORES

Los autores declaran no tener conflictos de interés en la presente publicación en ninguna de sus fases.

7 REFERENCIAS

- Aguado Molina, R., Casteleiro Roca, J. L., Jove Pérez, E., Zayas Gato, F., Quintián Pardo, H. y Calvo Rolle, J.L. (2021). Hidrógeno y su almacenamiento: el futuro de la energía eléctrica. Universidade da Coruña.
- Asociación Peruana de Hidrógeno (2021). Hidrógeno verde: Creación de una visión de prosperidad compartida y sostenible [Archivo PDF]. <https://h2.pe/uploads/H2-Peru%CC%81-Position-Paper-280921-2.pdf>
- BloombergNef. (2018). Climatescope 2018 [Archivo PDF]. <https://2018.global-climatescope.org/assets/data/reports/climatescope-2018-report-en.pdf>
- Brijaldo, M., Castillo, C., y Pérez, G. (2021). Principales Rutas en la Producción de Hidrógeno. Ingeniería y Competitividad, 23(2), 2-41. <https://doi.org/10.25100/iyv.v23i2.11155>
- Fernández, J., Hermana, R. y Sánchez, J. (2021). Perspectivas de desarrollo de un mercado global de Hidrógeno [Archivo PDF]. <https://www.orkestra.deusto.es>
- Fúnez, C. y Reyes, L. (2019). El hidrógeno como vector energético. Universidad Autónoma de Chile. <https://repositorio.uaautonoma.cl/bitstream/handle/20.500.12728/3191/Hidrogeno.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gandhi, K., Apostelrelis, H. y Sgouridis, S. (2022), "Catching the hydrogen train: Economics-driven green hydrogen adoption potential in the United Arab Emirates", International Journal of Hydrogen Energy, 47(53), 22285-22301. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.055>
- Jaso, M. A. (2021). Análisis metodológico de los estudios prospectivos que exploran el futuro de la bioeconomía. Nova Scientia, 13(2), 1-27. <http://dx.doi.org/10.21640/ns.v13i26.2272>
- Jiménez, F. (2020). Evaluación técnica y económica del uso de hidrógeno verde en aplicaciones para la industria y desplazamiento de combustible fósil. Orphanet Journal of Rare Diseases, 21(1), 1–9.

- IEA (2021). Special Report on Clean Energy Innovation: Accelerating Technology Progress for a Sustainable Future [Archivo PDF]. https://ieaghg.org/docs/General_Docs/Reports/Ph424%20Hydrogen%20in%20nat%20gas.pdf
- IRENA. (2020). Green Hydrogen: A guide to policy Making. International Renewable Energy Agency [Archivo PDF]. <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Green-hydrogen>
- IRENA (2022), Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi [Archivo PDF]. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jan/IRENA_Geopolitics_Hydrogen_2022.pdf?rev=1cfe49eee979409686f101ce24ffd71a
- Lambert, M. (2020). Hydrogen and decarbonisation of gas: false dawn or silver bullet? Energy Insight 66 [Archivo PDF]. <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2020/03/Insight-66-Hydrogen-and-Decarbonisation-of-Gas.pdf>
- Martín, I, y Fernández, J. (2022). El futuro del hidrógeno como vector energético y la sostenibilidad. Revista Economistas, 176, 73-83. <https://privado.cemad.es/revistas/online/Revistas/Economistas-Num-176-WEB.pdf/192>
- McKenna, R., Pfenninger, S., Heinrichs, H., Schmidt, J., Staffell, I., Bauer, C., Gruber, K., Hahmann, A. N., Jansen, M., Klingler, M., Landwehr, N., Larsén, X. G., Lilliestam, J., Pickering, B., Robinius, M., Tröndle, T., Turkovska, O., Wehrle, S., Weinand, J. M., & Wohland, J. (2022). High-resolution large-scale onshore wind energy assessments: A review of potential definitions, methodologies and future research needs. Renewable Energy, 182, 659-684. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.027>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD). (2020). Hoja de Ruta del Hidrógeno [Archivo PDF]. https://energia.gob.es/es-es/Novedades/Documents/hoja_de_ruta_del_hidrogeno.pdf
- Muñoz, J., Beleño, W. y Díaz, H. (2022). Análisis del potencial del uso de hidrógeno verde para reducción de emisiones de carbono en Colombia. Reventón Energético, 20(1), 57–72. <https://doi.org/10.18273/revfue.v20n1-2022006>
- Rashid, M. M., Mesfer, M. K. Al, Naseem, H., & Danish, M. (2015). Hydrogen Production by Water Electrolysis: A Review of Alkaline Water Electrolysis, PEM Water Electrolysis and High Temperature Water Electrolysis. International Journal of Engineering and Advanced Technology, 4(3), 80–93. https://www.researchgate.net/publication/273125977_Hydrogen_Production_by_Water_Electrolysis_A_Review_of_Alkaline_Water_Electrolysis_PEM_Water_Electrolysis_and_High_Temperature_Water_Electrolysis
- Schneider, H. (2021). Hidrógeno verde en América Latina: posibilidades, barreras y oportunidades [Archivo PDF]. <https://www.kas.de/documents/273477/14464285/hidr%2525c3%252593geno+verde+en+am%2525c3%252589rica+latina.pdf/8bae839b-8621-adced02ab583105a2057?version=1.0&t=1679411650518>
- Universidad Católica del Uruguay (2022). Monitor Hidrógeno Verde [Archivo PDF]. <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/uy/undp-uy-Monitor-Hidrogeno-Verde-2022.pdf>

Contribución de autores

Autor	Contribución
Danilo Francisco Martínez Quiñonez	Análisis de los datos, búsqueda bibliográfica, redacción y revisión del artículo.