



15 al 17 de octubre 2024

Cámara Mercantil de productos del país

IMPULSORES Y LIMITANTES AL DESARROLLO DEL MERCADO DEL HIDRÓGENO VERDE

Giannina Pinotti, M.Sc. Ing. Química (*)

Ing Química de Udelar en 2014, en 2018 Msc. en Ingeniería Sanitaria y Ambiental en IHE-Delft y en julio 2024 Máster en Desarrollo Económico e Innovación perfil Economía circular y Sostenibilidad de la Universidad de Santiago de Compostela.

El trabajo presentado forma parte del trabajo final del Máster en Desarrollo Económico e Innovación tutorizado por Xavier Vence (Catedrático de Economía Aplicada de la Facultad de Economía, Universidad de Santiago de Compostela) y Luis Miguel Varela Cabo (Catedrático de Física de la Materia Condensada de la Facultad de Física, Universidad de Santiago de Compostela).



TEMA: Energía: energías renovables, eficiencia energética, producción más limpia

(*): Montevideo – Uruguay - Tel.: 099727320– e-mail: gianninapinotti@gmail.com

RESUMEN

El calentamiento global se ha identificado como un problema planetario mayor debido a las actividades humanas actuales y las emisiones de GEI asociadas, que conducen a desastres naturales, pérdida de biodiversidad e impactos socioeconómicos. El hidrógeno verde está emergiendo como una alternativa para sectores difíciles de descarbonizar y promover el desarrollo económico en países menos industrializados. Este estudio revisa el mercado global del hidrógeno verde, abarcando tecnologías de producción, usos, comercio, impactos ambientales, financiamiento y estrategias, utilizando un análisis PESTEL para identificar impulsores y barreras. A pesar de ser una alternativa emergente, actualmente el hidrógeno verde representa menos del 1% del consumo mundial de hidrógeno (95 Mt). Los estudios proyectan un crecimiento de la demanda a alrededor de 40 Mt para 2030 y 200-600 Mt para 2050. Se considera que la electrólisis del agua, impulsada por energías renovables, será el principal método de producción futuro, con tecnologías alcalinas y PEM siendo las más maduras. Las mejoras tecnológicas y las economías de escala son cruciales para la adopción, influyendo en la eficiencia y la reducción de costos. Las políticas gubernamentales y los subsidios están impulsando las inversiones iniciales, pero aún existen importantes brechas de inversión, especialmente en países en desarrollo. Las principales barreras incluyen la incertidumbre en la demanda, la competitividad y los riesgos tecnológicos. Una parte significativa de la producción futura está destinada a la exportación, requiriendo infraestructura habilitante. Los impactos ambientales y sociales del desarrollo a gran escala incluyen la disrupción de ecosistemas y el consumo de recursos. Es probable la dependencia tecnológica de unos pocos países, enfatizando la necesidad de desarrollar capacidades locales.

Palabras Clave: Hidrógeno Verde; Energías Renovables; Desarrollo de Mercado; Análisis de Políticas; Barreras de Inversión; Transición Energética.

INTRODUCCIÓN

El calentamiento global se ha consolidado como uno de los desafíos más críticos de nuestra era, evidenciado por el incremento de eventos climáticos extremos que afectan gravemente la seguridad alimentaria, la salud pública, las economías globales y la sociedad en su conjunto (IPCC, 2023). El aumento de la temperatura global en 1.1°C respecto a los niveles preindustriales durante la última década, debido principalmente a la actividad humana, ha sido confirmado por el Panel Intergubernamental del



15 al 17 de octubre 2024

Cámara Mercantil de productos del país

Cambio Climático (IPCC), mientras que más recientemente, la Organización Meteorológica Mundial ha reportado que 2023 fue el año más caluroso registrado hasta la fecha, con un incremento de 1,45°C respecto a la era preindustrial diferencia en la temperatura media respecto a los niveles preindustriales de 1,45 °C (Organización Meteorológica Mundial, 2024). Este panorama sitúa a la humanidad en una encrucijada, donde el cumplimiento del límite de 1,5°C establecido en el Acuerdo de París parece cada vez más desafiante. En respuesta, los principales actores de la economía mundial han definido ambiciosas metas de descarbonización, dirigidas a alcanzar la neutralidad en carbono para mediados de siglo.

En este contexto, la búsqueda de alternativas energéticas sostenibles ha puesto al hidrógeno verde, aún en condición de tecnología emergente y en fase de desarrollo tanto a nivel tecnológico como industrial, en el centro de la discusión como un posible catalizador de la transición hacia una economía descarbonizada. Este vector energético, que puede almacenar y transportar energía renovable a gran escala, se presenta como una solución para sectores difíciles de electrificar, tales como el transporte de larga distancia y la industria pesada, y dota de autonomía y flexibilidad al abastecimiento eléctrico con energías renovables.

Más de 40 países y regiones responsables por el 80% de las emisiones globales de GEI cuentan con estrategias para el desarrollo de este energético (International Energy Agency [IEA], 2023). Entre las más importantes, la Unión Europea ha incluido esta tecnología como parte fundamental de su estrategia climática, y luego aumentado significativamente sus metas en el marco del programa RePower EU, impulsado a raíz de la crisis energética vinculada al conflicto Rusia-Ucrania. También en EE.UU. se han definido objetivos similares de producción a los de la UE, con importantes incentivos fiscales a la producción. Por su parte China, mayor productor y consumidor de hidrógeno de origen fósil, cuenta con un importante potencial de energía renovable y es el mayor fabricante de electrolizadores, y también ha definido objetivos importantes para el hidrógeno verde. No obstante, a pesar de sus objetivos de producción se espera que estas regiones sean importadoras netas de hidrógeno, debido a su importante demanda energética.

En ese marco, aquellos países con energía renovable abundante y barata podrían establecerse como lugares estratégicos para su producción y uso, pero su desarrollo dependerá también de otros factores como la infraestructura y el apoyo gubernamental (International Renewable Energy Agency [IRENA], 2022). Esto representa una importante oportunidad para los países en desarrollo y mercados emergentes, que contribuirían en unas 20 Mton anuales al 2030, alcanzando el 50% de la producción global proyectada hasta ese entonces (Energy Sector Management Assistance Program et al. [ESMAP], 2023). Entre estos países, en Latinoamérica se destaca Chile, el cual podría producir el hidrógeno más barato en el mundo con la energía solar del desierto de Atacama y ya cuenta con una estrategia de desarrollo desde el año 2020 en la que prevé un acelerado desarrollo del hidrógeno verde instalando 5 GW de electrólisis al año 2025, proyectándose como uno de los principales exportadores a 2040 (Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, 2020). También Uruguay tiene planes de desarrollo de la industria del hidrógeno verde, aprovechando la elevada participación de fuentes renovables en su matriz energética y el potencial de combinar energía solar fotovoltaica y eólica especialmente en la región norte del país. En dicho marco también se ha definido una hoja de ruta con objetivos que alcanzan los 9 GW de instalaciones de electrólisis a 2040 acompañados de nuevas instalaciones de renovables por un total de 18 GW, y también proyecta precios competitivos con el mercado internacional para su producción (Ministerio de Industria, Energía y Minería, 2023).

No obstante, a pesar del fuerte impulso global, los proyectos de hidrógeno verde enfrentan barreras considerables a nivel global, y que cobran mayor relevancia en los países en desarrollo, incluyendo la falta de demanda asegurada, desafíos tecnológicos y la ausencia de infraestructuras adecuadas.

Asimismo, aunque el hidrógeno verde presenta oportunidades económicas y ambientales, su desarrollo podría conllevar impactos significativos, como la huella material en la cadena de suministro y el consumo de agua en áreas con estrés hídrico, así como la intensificación del uso de suelo y la reducción de biodiversidad (The World Bank & Hydrogen Council, 2022). Además, un enfoque tecnocrático en su infraestructura podría exacerbar desigualdades y vulnerabilidades socioambientales, generando desequilibrios a largo plazo si no se consideran los impactos sociales (Sovacool, 2021; Hanusch & Schad, 2021).

Dado el complejo entramado de factores que influyen en el desarrollo del hidrógeno verde, es esencial



15 al 17 de octubre 2024

Cámara Mercantil de productos del país

adoptar una perspectiva integral que examine tanto los impulsores como las barreras que enfrenta este mercado emergente. Para definir estrategias óptimas, es fundamental considerar no solo los aspectos económicos, sino también los impactos ambientales y sociales. Diversos estudios científicos, consultoras económicas e instituciones con intereses variados han abordado esta temática. Este trabajo busca ofrecer una perspectiva que sintetice estas visiones, contribuyendo a una transición energética verdaderamente sostenible.

OBJETIVOS y ALCANCE

El presente trabajo se propone analizar el estado de situación del hidrógeno verde a escala mundial, incluyendo sus tecnologías de producción, usos previstos, intercambios comerciales, implicancias ambientales, fuentes de financiamiento y las estrategias nacionales y regionales y sintetizar los principales factores que ofician como impulsores y limitantes para el desarrollo de los proyectos y el nacimiento del nuevo mercado del hidrógeno.

METODOLOGÍA

El trabajo se desarrolló en el primer semestre del año 2024. Durante este período, se realizó un exhaustivo relevamiento de información, que incluyó la revisión crítica de literatura científica y documentos recientes elaborados por instituciones clave en el sector de la energía y puntualmente del hidrógeno, además de las políticas nacionales y regionales en la materia. La revisión se centró en aspectos como la producción, uso, comercio, infraestructura, inversión, y el rol gubernamental en la transición energética, además de los aspectos ambientales y sociales asociados. El análisis de esta información se organizó mediante la herramienta PESTEL, identificando por un lado los principales elementos que ofician como motores para el desarrollo del mercado del hidrógeno verde, y por otro lado las barreras que enfrenta como mercado emergente.

RESULTADOS

En la actualidad el hidrógeno es un insumo industrial en refinerías, fabricación de fertilizantes y productos químicos, con una demanda global que alcanzó las 95 Mt en el año 2022 (IEA,2023). Se obtiene mayoritariamente de combustibles fósiles, y las tecnologías de producción de bajas emisiones representan aún menos del 1% (IEA,2023). A pesar de ello, se espera un rápido crecimiento en su producción en las próximas décadas debido a políticas enfocadas en su uso como fuente de energía limpia para, entre otros, el transporte pesado, la industria del acero y el almacenamiento de energía renovable, como parte de la descarbonización a 2050. Las vías principales de producción para ese fin serían por un lado el hidrógeno renovable obtenido mediante electrólisis de agua alimentada de energía de origen renovable, a lo que se conoce como hidrógeno verde, y por otro lado el conocido como hidrógeno azul, que se obtiene empleando combustibles fósiles (principalmente reformado de metano con vapor) y capturando, almacenando y/o utilizando las emisiones de carbono del proceso.

En ese marco se proyecta un importante crecimiento del mercado del hidrógeno para las próximas décadas, aunque el futuro de la demanda de hidrógeno para la descarbonización y su distribución entre métodos de producción aún no están claros, con estudios que presentan escenarios que van desde la consecución de las emisiones netas cero hasta el incumplimiento de los objetivos climáticos, a pesar de que las ambiciosas metas políticas. Un análisis comparativo entre 8 estudios realizado por ESMAP et. al. (2023) pone de manifiesto que las proyecciones de consumo más altas provienen de instituciones especializadas en energías renovables, mientras que otras, como la IEA, ofrecen una visión más moderada. No obstante, todas coinciden en que se daría un incremento de la producción de hidrógeno bajo en emisiones, que alcanzaría a 2030 entre 11 y 90 Mt/año (en promedio 40 Mton/año) y a 2050 las variaciones son mayores, promediando unas 500 Mt/año, pero con un rango de 235 a 682 Mt/año.

Además, según el citado estudio de ESMAP et. al. (2023) las proyecciones coinciden en que el hidrógeno renovable será mayoritario a 2050, variando entre un 60% y 100% de la demanda total. Igualmente, el hidrógeno azul, con ventajas como menor CAPEX y una cadena de suministro ya desarrollada, se presenta como una alternativa competitiva a corto y mediano plazo para acelerar la adopción del hidrógeno durante la transición energética (IEA, 2023). Así combinar hidrógeno azul y renovable podría reducir costos y acelerar la transición, especialmente en regiones con abundante gas natural (Hydrogen Council & McKinsey & Company, 2021; Alverà, 2021).



15 al 17 de octubre 2024

Cámara Mercantil de productos del país

La alta variabilidad entre las diferentes proyecciones, especialmente para el horizonte a 2050 pone de manifiesto el alto grado de incertidumbre que rodea a este mercado y subraya la importancia de comprender los motores y barreras que enfrenta. A continuación, organizados según la lógica de la herramienta PESTEL, en factores Políticos, Económicos, Sociales, Tecnológicos, Ambientales y Legales, se presenta un breve resumen del análisis realizado en ese sentido, sintetizado en la Tabla 1.

Factores políticos - Quizás sea en la escena política en la que resulta más tangible la realidad del hidrógeno como vector energético del futuro. A nivel internacional, varios de los compromisos de neutralidad climática en un horizonte cercano a 2050-2060, han sido plasmados en políticas nacionales. Particularmente, según la última revisión del estado del hidrógeno de la IEA del año 2023, 41 países responsables de más del 80% de las emisiones de GEI cuentan con una estrategia para el hidrógeno.

Los acuerdos de cooperación, principalmente bilaterales, están impulsando proyectos de hidrógeno en los países en vías de desarrollo para asegurar el suministro a países desarrollados, mientras que las principales economías como la UE, EE. UU., China y Japón han definido estrategias y fondos para aumentar significativamente su producción y consumo de hidrógeno hacia 2030. Estas dinámicas han creado oportunidades, llevando a varios países en desarrollo y economías emergentes a buscar un papel pionero en el mercado del hidrógeno.

Sin embargo, las tensiones geopolíticas y comerciales pueden dificultar el acceso a recursos y tecnología para la producción de hidrógeno verde, lo que afecta la estabilidad del suministro y los precios. Por un lado, los yacimientos de materiales críticos necesarios para fabricar electrolizadores se encuentran concentrados en unos pocos países, como es el caso del Iridio y el Platino para la tecnología PEM principalmente en Sudáfrica y del 95% de los materiales para electrolizadores SOEC en China (IRENA, 2020). Las tecnologías alternativas de electrólisis, como las basadas en níquel y acero, podrían ofrecer una mayor diversificación en la cadena de suministro, pero todavía se enfrentan a desafíos significativos en términos de escalabilidad y costos (IRENA, 2020).

Por otra parte, en la industria de fabricación de electrolizadores, China lidera el mercado con las tecnologías de menores costos de capital, representando más del 50% de la capacidad actual, seguido por Europa con un 20% y Norteamérica con un 10% (IEA, 2023). La alta dependencia de tecnologías provenientes de las economías avanzadas y China, resalta la necesidad de políticas de transferencia tecnológica y desarrollo de capacidades internas en los países en desarrollo, para asegurarse una participación equitativa en los beneficios económicos derivados de la economía del hidrógeno.

Además, la significativa necesidad de financiación pública que enfrenta el sector ralentiza su evolución, especialmente en países con menores recursos y acceso al financiamiento, aspecto sobre el que se profundiza en la sección sobre aspectos económicos (ESMAP et al., 2023). En términos de regulación, aunque muchos gobiernos están avanzando en forma independiente, se requiere una cooperación internacional para armonizar definiciones y habilitar el mercado global (IEA, 2023).

Aspectos económicos - Por el lado de las variables económicas es donde se encuentran las mayores barreras al desarrollo del mercado de este insumo. Por un lado, debido a que el costo de producción es muy superior a las alternativas de origen fósil, situación que se proyecta se extienda incluso más allá de 2030. A pesar de que existe una importante variabilidad entre regiones debido al peso del precio de la energía renovable el costo de producción actual varía entre 5 y 10 EUR/kg, mientras para el hidrógeno producido mediante reformado de metano con vapor (SMR) es de 1- 2 EUR/kg o 3 – 5 EUR/kg si se incorpora captura y almacenamiento de carbono (Hydrogen Europe, 2024). No obstante, los apoyos estatales buscan incentivar algunos sectores industriales clave, como las refinerías y la industria química, que ya utilizan hidrógeno, para migrar hacia el hidrógeno verde, promoviendo los primeros desarrollos productivos y favoreciendo las economías de escala.

Recién para 2050 los estudios relevados proyectan un hidrógeno verde competitivo con el azul y el gris a un precio aproximado de 2 USD/kg (ESMAP et. al., 2023; Hydrogen Council & McKinsey & Company, 2023a), gracias a la reducción de costos de producción a raíz de mejoras tecnológicas y economías de escala, y por el incremento en los gravámenes sobre las emisiones de carbono, mejorando la posición del hidrógeno frente a otros energéticos.



15 al 17 de octubre 2024

Cámara Mercantil de productos del país

En ese sentido, los mercados de carbono, podrían ser un motor crucial para impulsar la producción de hidrógeno verde incentivando la adopción de tecnologías limpias. Sin embargo, la variabilidad de estos entre regiones también podría actuar como barrera promoviendo la deslocalización de la producción. El análisis de DNV (2022) muestra grandes diferencias en los precios futuros del carbono entre continentes. Mientras que EE.UU. no cuenta con un mercado federal, proyectando precios de 25-70 USD/ton CO₂ para 2030-2050, la UE con su sistema de comercio de emisiones establecido podría alcanzar 95-135 USD/ton CO₂ en el mismo período. Japón, Corea del Sur, Nueva Zelanda y Australia presentan una posición intermedia, y China, con un sistema de comercio de emisiones en expansión, proyecta precios en aumento, mientras que en el resto de las regiones los precios son bajos y los esquemas poco definidos.

A pesar de que los gobiernos han implementado subsidios y créditos fiscales para cerrar la "brecha de financiamiento," que oscila entre 10 y 40 mil millones de dólares anuales, estos esfuerzos no son suficientes para asegurar decisiones finales de inversión (ESMAP et al., 2023). En respuesta, la banca multilateral y algunos países desarrollados están promoviendo mecanismos de apoyo en países en desarrollo, buscando reducir riesgos y atraer la inversión privada. Sin embargo, el apoyo público inicial sigue siendo insuficiente para cerrar la brecha de costos y movilizar el capital necesario para garantizar la viabilidad de estos proyectos a largo plazo (IEA, 2023).

Se estima que producir 1 Mt de hidrógeno renovable al año requiere 30 mil millones de dólares (ESMAP et al., 2023). Para 2030, las inversiones anuales necesarias estimadas varían entre 100 y 165 mil millones de dólares, y entre 170 y 470 mil millones de dólares para 2050 (IEA, 2023; Hydrogen Council & McKinsey, 2023b). A pesar de las proyecciones optimistas, la incertidumbre en la demanda futura especialmente en sectores emergentes como el transporte, la producción de acero y la calefacción, genera variabilidad en las proyecciones y retrasa las decisiones de inversión en proyectos planificados y los costos de capital limitan el compromiso del capital privado y dificultan el acceso al crédito, lo que podría retrasar el desarrollo de proyectos clave (Hydrogen Council & McKinsey, 2023b). Además, en algunos sectores, el hidrógeno presenta menores eficiencias que alternativas como el gas natural o las bombas de calor, limitando su competitividad en aplicaciones como la calefacción de edificios y el transporte marítimo (DNV, 2022).

Otro factor de incertidumbre en la demanda es la importante dependencia de los proyectos del comercio de larga distancia, permitiendo a países con recursos energéticos renovables limitados importar este insumo, beneficiando tanto a exportadores como a importadores al mejorar la seguridad energética y diversificar los proveedores (IEA, 2023). Sin embargo, el transporte de hidrógeno enfrenta desafíos significativos debido a los altos costos que pueden hasta duplicar el precio y la complejidad del proceso, lo que podría favorecer industria asociada en países con disponibilidad de recursos naturales (ESMAP et al., 2023). A pesar de estos desafíos, se espera que entre el 25% y el 31% de la producción global de hidrógeno se comercie internacionalmente para 2050, con proyecciones que indican que 200 Mt de hidrógeno serán comercializadas a larga distancia (Hydrogen Council & McKinsey & Company, 2023a). Las principales rutas comerciales conectarán regiones como Australia, América Latina y América del Norte con Europa y Asia, utilizando mayormente el amoníaco como portador de hidrógeno (IEA, 2023).

Implicancias sociales - El impacto social del desarrollo de la economía del hidrógeno es un tema poco explorado en la literatura. Hanusch y Schad (2021) advierten que la construcción de infraestructuras energéticas sin considerar los efectos sociales podría generar desajustes socio-ecológicos duraderos. Mientras algunos ven al hidrógeno verde como crucial para los objetivos climáticos y la creación de empleos sostenibles, otros temen que perpetúe injusticias y condiciones laborales no reguladas en los países productores.

Akhtar et al. (2023) realizaron un análisis del ciclo de vida (LCA) social del hidrógeno verde, revelando que, aunque ofrece oportunidades de desarrollo económico y reducción de pobreza, también puede incrementar riesgos sociales como trabajo infantil y brechas salariales. Estos riesgos dependen de las condiciones socioeconómicas del país productor y de los proveedores de insumos clave, como China. Es crucial establecer regulaciones internacionales para asegurar que el desarrollo económico no comprometa el bienestar social.

El desarrollo del hidrógeno verde también plantea desafíos en la creación de empleo y la reconversión laboral. Según la Comisión Europea se estima la creación de miles de empleos en la cadena de valor del hidrógeno en la UE, aunque será necesario capacitar a los trabajadores desplazados por la transición



15 al 17 de octubre 2024

Cámara Mercantil de productos del país

desde las industrias de combustibles fósiles (European Commission et. al., 2020). Además, aunque la aceptación social del hidrógeno verde es mayoritaria, su expansión podría generar conflictos, especialmente en regiones con escasez de agua o donde se instalen infraestructuras renovables masivas.

Finalmente, la aceptación del hidrógeno verde en el sector residencial y de transporte dependerá de la percepción de su seguridad, eficiencia y costos. Aunque tiene el potencial de ofrecer soluciones limpias, la transición hacia esta tecnología debe asegurarse de no ampliar las desigualdades existentes, garantizando que sus beneficios lleguen a todos los sectores de la sociedad, especialmente a los más vulnerables.

Aspectos tecnológicos - El desarrollo del hidrógeno verde enfrenta barreras tecnológicas significativas, en tanto muchas de las tecnologías en su cadena de valor no han alcanzado la madurez. Esto afecta principalmente la eficiencia de producción y uso, elevando los costos y generando incertidumbres en los proyectos pioneros, lo que complica su financiación. Aunque las tecnologías para la generación de energía renovable, como la solar y la eólica, están bastante desarrolladas, áreas como las turbinas flotantes para energía eólica marina aún no han alcanzado completamente la madurez tecnológica (TRL 8 según la clasificación de la IEA), lo que sugiere que se esperan avances y reducciones de costos con el tiempo.

Los electrolizadores, el principal componente del CAPEX en proyectos de hidrógeno verde, están previstos a mejorar en eficiencia y reducir costos gracias a la inversión en I+D y la escalabilidad. Sin embargo, la inflación y el aumento del costo del capital han generado incertidumbre en cuanto al horizonte en el que se alcanzaría dicha reducción. Según Hydrogen Europe (2024), el costo actual de la electrólisis alcalina en Europa promedia los 2250 €/kW, lo cual supera ampliamente las previsiones de 400 €/kW de Clean Hydrogen Joint Undertaking (2022). Otra barrera identificada para la tecnología europea son los desafíos de competitividad respecto a los electrolizadores chinos que son hasta cuatro veces más baratos (Hydrogen Europe, 2024). Aunque se esperan mejoras en eficiencia y durabilidad, estas no compensarán las diferencias de costos con China en el horizonte 2030.

El desarrollo del hidrógeno también depende de avances en almacenamiento y transporte. A pesar de su alta densidad energética gravimétrica, su baja densidad volumétrica plantea retos. Las opciones de almacenamiento incluyen hidrógeno comprimido, líquido y materiales como hidruros, cada una con ventajas y desventajas según la aplicación (Yang et al., 2023). Las tuberías son más eficientes para transporte a media distancia, mientras que el transporte marítimo es viable para largas distancias en forma de amoníaco o LOHC, aunque ambos métodos enfrentan desafíos técnicos y ambientales (IEA, 2023; Yang et al., 2023).

La reconversión de la red de gas natural existente en Europa para transportar hidrógeno es un factor clave en el desarrollo de la infraestructura del hidrógeno. La iniciativa European Hydrogen Backbone, busca transformar más de la mitad de las redes de gas natural en hidrodutos, lo que implicaría costos de adaptación significativamente menores, entre el 10% y el 25% de la construcción de nuevas tuberías (Alverà, 2021). Esta red, que conectará 28 países europeos para 2040, podría cubrir casi 53.000 km y facilitar el transporte de grandes cantidades de hidrógeno, con un costo adicional de entre 0,10 y 0,32 € por kg cada 1000 km (van Rossum et al., 2022).

Implicancias ambientales - El hidrógeno verde es promovido como un portador de energía limpia debido a su potencial para reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Sin embargo, su impacto ambiental depende del método de producción utilizado. La producción de hidrógeno mediante electrólisis alimentada por energías renovables tiene emisiones casi nulas de GEI, mientras que la producción mediante métodos convencionales como el reformado de metano con vapor (SMR) puede generar emisiones significativas, a menos que se utilicen tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CCS). Además, las emisiones no solo provienen de la operación de las plantas, sino también de las fases iniciales de minería, fabricación y construcción de la infraestructura necesaria, elementos que tienen un mayor peso en el caso del hidrógeno verde (Li et al., 2024).

Los LCA han demostrado que la electrólisis con energías renovables es preferible en términos de potencial de calentamiento global (GWP) comparado con el SMR sin CCS, aunque la producción y transporte de hidrógeno también conllevan desafíos ambientales adicionales. El transporte y almacenamiento de hidrógeno, debido a su baja densidad y alta inflamabilidad, requiere de un alto consumo energético y de



15 al 17 de octubre 2024

Cámara Mercantil de productos del país

materiales, lo que podría incrementar el GWP calculado. Sin embargo, opciones como la producción in situ mediante electrólisis, cuando es viable, pueden minimizar estos impactos (Arrigoni et al., 2024).

La producción de hidrógeno verde tiene también una significativa huella hídrica, ya que se requieren alrededor de 9 kg de agua por kg de hidrógeno, cifra que puede triplicarse debido a procesos de purificación y enfriamiento, alcanzando casi los 30 kg/kg H₂. Además, el uso de agua varía según las fuentes de energía utilizadas, siendo ligeramente mayor en la fotovoltaica que en la eólica, aunque en ambos casos la producción de hidrógeno mediante electrólisis consume menor cantidad de agua que la producción mediante SMR (Arrigoni et al., 2024). Igualmente se ha señalado que esta demanda podría ejercer una presión considerable sobre los recursos hídricos locales, especialmente en regiones con estrés hídrico medio a alto, teniendo en cuenta que el 50% de los proyectos de hidrógeno verde se planifican en planificadas en estas zonas (Moreira & Laing, 2022). En ese marco, es clave la inclusión de análisis de impacto hídrico y la consideración de fuentes alternativas, como el reciclaje de aguas residuales y la desalinización, aunque estas opciones aún no son ampliamente adoptadas en la agenda de proyectos actuales (Moreira & Laing, 2022; Alverà, 2021).

El gran despliegue de instalaciones de energía renovable necesario para producir hidrógeno verde, estimado en una capacidad adicional de 8000 GW para 2050, implica significativos impactos ambientales y una alta huella material. Este desarrollo no solo afecta a los ecosistemas y poblaciones locales, sino que también incrementa la presión sobre la minería y el procesamiento de materiales necesarios para las tecnologías de hidrógeno y su infraestructura. La demanda de minerales críticos como el platino y el iridio, esenciales para electrolizadores PEM, podría alcanzar niveles insostenibles en las próximas décadas, superando el 160% de la producción actual para 2040 en el caso del iridio (Moreira & Laing, 2022). Estos materiales no solo son escasos, sino que su extracción es intensiva en energía y emisiones, presentando desafíos adicionales para la sostenibilidad del hidrógeno verde, aunque en términos globales representan una fracción baja del consumo de energía y su huella de carbono (Moreira & Laing, 2022; IRENA, 2020).

Aspectos legales - La falta de un marco legal y normativo claro es también un importante obstáculo para el desarrollo de la economía del hidrógeno. Debido a que no es posible identificar una vez fabricado el hidrógeno la intensidad de sus emisiones, es crucial regular y certificar las emisiones asociadas a su producción para evitar la comercialización de combustibles con altos niveles de carbono como alternativas limpias (IEA, 2023). Varios países están estableciendo paralelamente regulaciones y criterios de certificación de los atributos ambientales del hidrógeno, según IEA (2023), 7 gobiernos ya tienen marcos regulatorios implementados, mientras que otros 6 estaban trabajando en su definición, aunque aún no se han definido las metodologías de cumplimiento. En este contexto, la norma ISO 19870-1, enfocada en las metodologías de cálculo de las emisiones del ciclo de vida del hidrógeno, podría reducir las incertidumbres para los productores y ayudar a construir un mercado internacional (Stones, 2023).

La regulación de emisiones de GEI asociadas a la producción de hidrógeno para su consideración como "verde" varía significativamente entre distintos marcos regulatorios. Por ejemplo, el acto delegado (EU) 2023/1185 de la UE establece un límite de emisiones de 28.2 gCO₂e/MJ, que corresponde a un ahorro del 70% respecto al combustible fósil contrafactual. En contraste, la legislación de EE.UU. bajo la IRA define un umbral ligeramente superior, de 4 kgCO₂e/kg H₂ (equivalente a 33.3 gCO₂e/MJ). Además, aunque ambas normativas emplean un enfoque de LCA, difieren en su alcance: la UE incluye las fases de transporte y uso final, mientras que EE.UU. y otros marcos solo consideran las emisiones hasta la salida de la producción (cradle-to-gate). Además, la IRA de EE.UU. incentiva directamente la reducción de emisiones mediante créditos fiscales escalonados según el nivel de emisión de hidrógeno, exigiendo también el cumplimiento de directrices específicas sobre localización y temporalidad, similares a las europeas (Hydrogen Europe, 2024).

La Unión Europea, a través de la Directiva RED III, ha definido regulaciones específicas para el hidrógeno que incluyen objetivos ambiciosos para su uso en sectores como el industrial y el transporte, junto con requisitos de sostenibilidad para su producción, como la correlación geográfica y temporal de las energías renovables. Estas regulaciones, a pesar de sus desafíos, ofrecen incentivos significativos, como subsidios, para fomentar la adopción del hidrógeno verde (Stones, 2023). Además, como fuera analizado en los aspectos económicos, la falta de armonización en los mercados de carbono a nivel mundial, con precios que varían considerablemente entre regiones, podría afectar la competitividad del hidrógeno verde, aunque

15 al 17 de octubre 2024

Cámara Mercantil de productos del país

elementos regulatorios como el Mecanismo de Ajuste en Frontera de Carbono de la UE podrían ayudar a equilibrar estas diferencias a partir de 2026 (DNV, 2022).

Finalmente, la concesión de permisos para proyectos de hidrógeno sigue siendo un desafío importante. Acelerar estos permisos es crucial, pero debe hacerse de manera que no comprometa la sostenibilidad ambiental ni los derechos de las comunidades locales. Además, a pesar de los avances en seguridad y estándares tecnológicos en la cadena de valor del hidrógeno, sigue existiendo una brecha significativa en el desarrollo de protocolos para la medición y reparación de fugas de hidrógeno, un aspecto crucial para minimizar su impacto ambiental (IEA, 2023).

Tabla 1 - Resumen de análisis PESTEL sobre el desarrollo mundial del mercado del hidrógeno.

	Político	Económico	Social	Tecnológico	Ambiental	Legal
Motores	<ul style="list-style-type: none"> - Compromisos de descarbonización 2050 - Estrategias y políticas de desarrollo del H2 - Acuerdos cooperación con EMDCs - UE, EE.UU, China y Japón orientadas a desarrollar H2 - Oportunidad para países en desarrollo con renovables 	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción de costo del H2 verde esperable por mejoras tecnológicas y economías de escala - Demanda actual de H2 y adopción en sectores pioneros promueve su desarrollo - Mercados de carbono tienden a incrementar \$ - Fondos disponibles: públicos en países desarrollados y cierta financiación de banca multilateral y cooperación en países en desarrollo 	<ul style="list-style-type: none"> - Conciencia sobre el cambio climático y demanda de alternativas limpias - Generación de empleo de calidad - Oportunidad de desarrollo e independencia energética 	<ul style="list-style-type: none"> - Avances en tecnologías de producción - Expectativa de mejora y reducción de CAPEX con economía de escala y esfuerzos de I+D+i. - Posibilidad de uso y reconversión de red de gas natural para H2. - Tendencia creciente de patentes en tecnologías de producción y usos 	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción de emisiones de GEI - Menor consumo de agua que combustibles fósiles y posible uso de agua de mar y residual 	<ul style="list-style-type: none"> - Regulaciones y criterios de subsidios definidos en UE y EE. UU. - Requisitos sobre uso de combustibles renovables y mecanismo de ajuste en fronteras en la UE - Publicación de especificaciones ISO sobre medición de GEI en base a LCA del H2
Barreras	<ul style="list-style-type: none"> - Cadena de valor compleja sensible a tensiones geopolíticas - Dependencia tecnológica de economías avanzadas y China en particular - Dependencia de fondos públicos limita a EMDCs - Insuficiente cooperación para armonizar criterios de regulación y certificación. 	<ul style="list-style-type: none"> - No competitivo con alternativas fósiles al menos hasta 2030 - Altos costos de almacenamiento y transporte - Incertidumbre en la demanda limita decisiones de inversión. - Importante brecha de inversión privada - Dificultades de acceso a créditos por riesgos de proyectos - Desfasaje entre oferta y demanda, también en cuanto a incentivos - Disparidad en los mercados de carbono 	<ul style="list-style-type: none"> - Tensiones en la comunidad por usos de la tierra y recursos públicos. - Riesgos laborales en CV - Baja aceptación de algunas aplicaciones por temas de seguridad - Inversión pública en H2 no alineada con otras prioridades sociales 	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo TRL en algunas tecnologías de uso, almacenamiento, transporte y medición de fugas. - Dependencia tecnológica y baja competitividad en costos respecto a China - Discontinuidad en energías renovables limita factores de capacidad. 	<ul style="list-style-type: none"> - Consumo de agua afecta en zonas con estrés hídrico - Huella material de tecnologías e infraestructura - Impacto en ecosistemas por instalaciones de renovables y minería de materiales - Posible GWP asociado a fugas de H2 y uso de energía eléctrica de matriz con altas emisiones de CO2 - Aceleración de trámites podría afectar calidad de evaluación de impacto 	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de regulación en algunos sitios y disparidad entre otros - Aún no hay criterios de certificación y metodologías unificadas - Requisitos de correlación y adicionalidad de la UE limitan algunos desarrollos - Vacíos en normativa de seguridad y medición de fugas en la CV

CONCLUSIONES

Aunque el hidrógeno verde es prometedor como una alternativa para la descarbonización, enfrenta desafíos significativos en los planos económico, ambiental y social. A pesar de que su desarrollo tiene el potencial de cambiar la geopolítica energética al reducir la dependencia de combustibles fósiles, también puede perpetuar dependencias al requerir materiales y tecnologías específicos, controlados por unos pocos países. Esto sugiere que cada nación debe planificar estratégicamente su lugar en la cadena de valor del hidrógeno para maximizar beneficios económicos y sociales, y evitar que el desarrollo del hidrógeno se convierta en una simple exportación de recursos naturales con escasos beneficios locales. Es esencial que los países en desarrollo establezcan condiciones que prioricen el desarrollo de capacidades locales e impulsen la actividad industrial relacionada con el hidrógeno, para evitar que los beneficios sean captados mayoritariamente por los países más avanzados.



15 al 17 de octubre 2024

Cámara Mercantil de productos del país

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alverà, M. (2021). *The hydrogen revolution: A blueprint for the future of clean energy*. Hachette UK.
- Arrigoni, A., Dolci, F., Ortiz Cebolla, R., Weidner, E., D'agostini, T., Eynard, U., Santucci, V., & Mathieux, F. (2024). Environmental life cycle assessment (LCA) comparison of hydrogen delivery options within Europe. JRC Publications Repository. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC137953>
- Clean Hydrogen Joint Undertaking. (2022). *Annex to GB decision no. clean hydrogen-GB-2022-02. strategic research and innovation agenda 2021-2027*. Clean Hydrogen Partnership. <https://www.clean-hydrogen.europa.eu/system/files/2022-02/Clean%20Hydrogen%20JU%20SRIA%20-%20approved%20by%20GB%20-%20clean%20for%20publication%20%28ID%2013246486%29.pdf>
- DNV. (2022). *Hydrogen forecast to 2050*. Noruega: Autor <https://www.dnv.com/news/hydrogen-at-risk-of-being-the-great-missed-opportunity-of-the-energy-transition-226628/>
- Energy Sector Management Assistance Program, Organisation for Economic Co-operation and Development, Global Infrastructure Facility, & Hydrogen Council. (2023a). *Scaling hydrogen financing for development*. ESMAP Paper. © Washington, DC: World Bank. <http://hdl.handle.net/10986/41125> License: CC BY 3.0 IGO.
- European Commission: Directorate-General for Energy, Cihlar, J., Villar Lejarreta, A., Wang, A., Melgar, F. et al., *Hydrogen generation in Europe – Overview of costs and key benefits*, Publications Office, 2020, <https://data.europa.eu/doi/10.2833/122757>
- Hanusch, F., & Schad, M. (2021). Hydrogen research: Technology first, society second? *GAIA - Ecological Perspectives on Science and Society*, 30, 82-86. <https://10.14512/gaia.30.2.5>
- Hydrogen Council & McKinsey & Company. (2021). *Hydrogen for net zero: A critical cost-competitive energy vector*. Hydrogen Council. <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/11/Hydrogen-for-Net-Zero.pdf>
- Hydrogen Council & McKinsey & Company. (2023a). *Global hydrogen flows - 2023 update. considerations for evolving global hydrogen trade*. Hydrogen Council <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2023/11/Global-Hydrogen-Flows-2023-Update.pdf>
- Hydrogen Council, & McKinsey & Company. (2023b). *Hydrogen insights 2023. the state of the global hydrogen economy with a deep dive into renewable hydrogen cost evolution*. <https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2023-december-update/>
- Hydrogen Europe. (2024). *Clean hydrogen production pathways report 2024*. Hydrogen Europe. https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2024/06/2024_H2E_CleanH2ProductionPathwaysReport.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report. contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Geneva, Switzerland: Autor. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- International Energy Agency (2023). *Global hydrogen review 2023*. (CC BY 4.0). Paris: Autor <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ecdfc3bb-d212-4a4c-9ff7-6ce5b1e19cef/GlobalHydrogenReview2023.pdf>
- International Renewable Energy Agency (2020). *Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolyzers to meet the 1.5°C climate goal*. Abu Dhabi: Autor https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf
- International Renewable Energy Agency (2022). *Geopolítica de la transformación energética: El factor hidrógeno*. (). Abu Dabi: Autor. <https://search.proquest.com/docview/2726718856>
- Li, Y., Lin, R., O'Shea, R., Thaore, V., Wall, D., & Murphy, J. D. (2024). A perspective on three sustainable hydrogen production technologies with a focus on technology readiness level, cost of production and life cycle environmental impacts. *Heliyon*, 10(5), e26637. <https://10.1016/j.heliyon.2024.e26637>
- Ministerio de Energía del Gobierno de Chile. (2020). *Estrategia nacional de hidrógeno verde. Chile, fuente energética para un planeta cero emisiones*. Gobierno de Chile. https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf
- Ministerio de Industria, Energía y Minería. (2023). *Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde y derivados en Uruguay*. <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/comunicacion/noticias/hoja-ruta-hidrogeno-verde-uruguay-0>



15 al 17 de octubre 2024

Cámara Mercantil de productos del país

- Moreira, S., & Laing, T. J. (2022). *Sufficiency, sustainability, and circularity of critical materials for clean hydrogen*. World Bank. <http://hdl.handle.net/10986/38413>
- Organización Meteorológica Mundial (2024, 12 Enero) *La organización meteorológica mundial confirma que en 2023 la temperatura mundial batió todos los récords*. Organización Meteorológica Mundial. <https://wmo.int/es/news/media-centre/la-organizacion-meteorologica-mundial-confirma-que-en-2023-la-temperatura-mundial-batio-todos-los>
- Sovacool, B. K. (2021). Who are the victims of low-carbon transitions? towards a political ecology of climate change mitigation. *Energy Research & Social Science*, 73, 101916. <https://10.1016/j.erss.2021.101916>
- Stones, J. (2023, 13 septiembre). *ICIS EXPLAINS: RED III and its implications for hydrogen* | ICIS. ICIS: Independent Commodity Intelligence Services. Recuperado el 2 de Julio 2024 <https://www.icis.com/explore/resources/news/2023/09/13/10924662/icis-explains-red-iii-and-its-implications-for-hydrogen/>
- The World Bank & Hydrogen Council (2022). *Sufficiency, sustainability, and circularity of critical materials for clean hydrogen*. <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2022/12/WB-Hydrogen-Report-2022.pdf>
- van Rossum, R., Jens, J., La Guardia, G., Wang, A., Kühnen, L., & Overgaag, M. (2022). *European hydrogen backbone. A european hydrogen infrastructure vision covering 28 countries*. Guidehouse.
- Yang, M., Hunger, R., Berrettoni, S., Sprecher, B., & Wang, B. (2023). A review of hydrogen storage and transport technologies. *Clean Energy*, 7(1), 190-216. <https://10.1093/ce/zkad021>