



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS POLÍTICAS Y ADMINISTRATIVAS
CARRERA DE ECONOMÍA

Mercado de Hidrogeno Verde en América Latina
Trabajo de Titulación para optar al título de Economista

Autora:

Adriano Gusqui, Viviana Elizabeth

Tutor:

Econ. Diego Fernando Logroño León

Riobamba, Ecuador 2024

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, Adriano Gusqui Viviana Elizabeth, con cédula de ciudadanía 0605327667, autora del trabajo de investigación titulado: “**Mercado de Hidrógeno Verde en América Latina**”, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autora de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, a la fecha 13 de diciembre del 2024 de su presentación.




Viviana Elizabeth Adriano Gusqui

C.I: 0605327667

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, Diego Fernando Logroño León catedrático adscrito a la Facultad de Ciencias Políticas y Administrativas, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: “**Mercado de Hidrógeno Verde en América Latina**”, bajo la autoría de; Viviana Elizabeth Adriano Gusqui por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 13 días del mes de diciembre del 2024.



Eco. Diego Fernando Logroño León
C.I: 0603118969

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **MERCADO DE HIDRÓGENO VERDE EN AMERICA LATINA**, presentado por Viviana Elizabeth Adriano Gusqui, con cédula de identidad número 0605327667, bajo la tutoría de Eco. Diego Fernando Logroño León; certificamos que recomendamos la **APROBACIÓN** de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba a los 13 días del mes de diciembre del 2024.

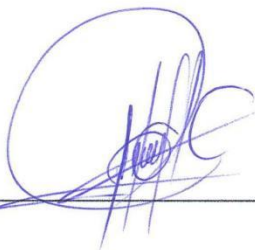
Abg. Diego Enrique Pinilla Rodríguez, Ph.D.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



Eco. Doris Nataly Gallegos Santillán, Ph.D.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Eco. Patricio Daniel Juelas Carrillo, Mgs.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO





CERTIFICACIÓN

Que, **Adriano Gusqui Viviana Elizabeth** con CC: **0605327667**, estudiante de la Carrera **ECONOMÍA**, Facultad de **CIENCIAS POLÍTICAS Y ADMINISTRATIVAS**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**Mercado de Hidrógeno verde en América Latina**", cumple con el **2%**, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **TURNITIN ORIGINALITY CHECK**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 27 de noviembre de 2024


Eco. Diego Fernando Logroño Leon.
TUTOR

DEDICATORIA

A las generaciones actuales, porque ustedes son el camino. “Espero que no consideremos el futuro solo como una oscuridad sombría. Aún tenemos muchas páginas en nuestra historia, y no deberíamos hablar como si el final ya estuviera escrito, tus inicios serán humildes, pero tu futuro será próspero. La única vez que deberías mirar atrás es para ver lo mucho que has avanzado”

Viviana Elizabeth Adriano Gusqui

AGRADECIMIENTO

Esta tesis está dedicada a todos ustedes, mi amada familia y a aquellos que me han brindado su apoyo y amor incondicional a lo largo de mi camino académico.

A mis queridos padres, su amor y sacrificio son mi fuente de inspiración constante. A mis ocho hermanos, ustedes son mi fuente de alegría y fortaleza. El compartir risas, lágrimas y triunfos con ustedes ha sido un regalo invaluable. Gracias por apoyarme y creer en mí, sin importar cuán desafiante fuera el camino. Mis amigos de la universidad, su compañerismo y apoyo incondicional han sido fundamentales en mi éxito. Gracias por estar siempre a mi lado, brindándome aliento, compartiendo conocimientos y superando desafíos juntos. Sin ustedes, este camino habría sido mucho más difícil.

Y a mi mayor inspiración, BTS, ustedes han sido mi escape y fortaleza cuando los desafíos y problemas llenaban mi mente. Sus palabras y música siempre han sido mi consuelo, y gracias a su mensaje de amor, perseverancia y autoaceptación, he encontrado la fuerza para superar cualquier obstáculo que se interponga en mi camino.

Con todo mi amor y gratitud

Viviana Elizabeth Adriano Gusqui

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA	
DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR	
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL	
CERTIFICADO ANTIPLAGIO	
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
RESUMEN	
ABSTRACT	
CAPÍTULO I. ASPECTOS GENERALES DE LA INVESTIGACIÓN	14
1.1. Introducción	14
1.2. Planteamiento del Problema y Justificación	14
1.3. Objetivos.....	17
1.3.1. Objetivo General	17
1.3.2. Objetivo Específicos.....	17
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	18
2.1. Estado del Arte.....	18
2.2. Marco Teórico.....	20
2.2.1. Características del mercado hidrógeno verde.....	24
2.2.2. Hidrógeno verde en América Latina	27
2.2.3. Participación del hidrógeno verde en América Latina	28
2.2.4. Hojas de ruta definición y composición	30
CAPÍTULO III. 3. METODOLOGÍA.....	32
3.1. Diseño de la Investigación.....	33
3.2. Estrategias de Búsqueda	33
3.2.1. Criterios de Elegibilidad	33
3.3. Organización de la información:	34
3.4. Análisis de la Información:	35
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36

4.1. Demanda de hidrógeno verde: estado actual y perspectivas.....	36
4.2. Análisis de las hojas de ruta de los países latinoamericanos de hidrógeno	40
4.3. Producción de electrolizadores de agua estado actual y perspectivas	43
4.4. Inversiones en hidrógeno y costos en celdas de combustible para la producción de hidrógeno verde	46
4.5. Análisis de proyectos de hidrógeno verde	50
4.6. Análisis de fabricación de electrolisis demandada en el mercado	55
4.7. Previsión de capacidades de electrolisis instaladas hasta 2030	62
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	66
5.1. Conclusiones	66
5.2. Recomendaciones	66
CAPÍTULO VI	68
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
CAPÍTULO VII. ANEXOS.....	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Métodos de producción de hidrógeno y sus colores.....	23
Tabla 2: Publicación de hojas de ruta o estrategias nacionales: país, producción materia prima, nombre del documento, fecha de publicación.....	40
Tabla 3: Esquema de colores, clasificación y capacidades de producción de hidrógeno, con base en procesos de producción, materia prima o fuente de energía	43
Tabla 4: Capacidades de electrolisis instaladas para producir hidrógeno verde estado actual y perspectivas en Latinoamérica.....	44
Tabla 5: Prototipo de Inversión en electrolizadores en la producción de hidrógeno para Chile	47
Tabla 6: Rango de costos de producción del H2 según años de previsión, tecnología y fuente de energía.....	49
Tabla 7: Selección de principales proyectos de hidrógeno verde: Nombre, Capacidad renovable, Ubicación, Estado, Fuente, Total	52
Tabla 8: Descripción general de las empresas fabricantes de electrolizadores de agua en América Latina 2019-2022.....	57
Tabla 9: Escenarios de previsión para Latinoamérica 2020 – 2030.	63
Tabla 10: Programas y políticas de países seleccionados en América Latina con relación a la descarbonización del transporte de carga	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Rutas de producción de hidrógeno a partir de diferentes fuentes -----	21
Figura 2: Rutas de Hidrógeno a partir de diferentes fuentes -----	21
Figura 3: AIE, Demanda mundial de hidrógeno, por sector en el escenario cero neto, 2019-2030 -----	24
Figura 4: AIE, Reducción acumulativa de emisiones por medida de mitigación en el Escenario Cero Neto, a nivel mundial 2021-2050 -----	26
Figura 5: AIE, Emisiones de gases de efecto invernadero por sector, Escenario Cero Neto, a nivel mundial, 2019. -----	26
Figura 6: AIE, Cambios en la demanda de hidrógeno por sector, caso Acelerado, América Latina, 2019- 2030. -----	27
Figura 7: Demanda de hidrógeno en América Latina, 2019 -----	28
Figura 8: Ciclo de Producción de Hidrógeno -----	36
Figura 9: Capacidad de instalación de electrolizadores a nivel mundial (IEA,2021)-----	44
Figura 10: Rango de costos de producción del H2 según tecnología y fuente de energía -	48
Figura 11: Capacidades mundiales acumuladas de fabricación de electrolizadores en gigavatios ordenadas por tecnología (2021-2025) -----	62

RESUMEN

Los organismos internacionales de cooperación indican estadísticas relevantes en América Latina; poseen altos potenciales para la producción de hidrógeno como fuente de energía estratégica a desafíos en sectores claves como la movilidad y la generación de electricidad. Actualmente, diversos países latinoamericanos han desarrollado, publicado y diversificado estrategias gubernamentales para impulsar el desarrollo de una economía basada en el hidrógeno. La presente investigación tiene como objetivo analizar las oportunidades, desafíos y perspectivas del mercado de hidrógeno verde en América Latina, con un enfoque en las políticas públicas, la infraestructura tecnológica y la cooperación regional. Para ello, se empleó una metodología que combinó un meta análisis con un enfoque cualitativo, utilizando un diseño documental apoyado en una revisión sistemática descriptiva que permitió integrar y analizar los resultados de múltiples estudios, proporcionando una estimación más precisa y completa sobre el tema investigado. Los resultados revelaron que la producción de hidrógeno verde en América Latina es limitada por falta de tecnología disponible, ya que su capacidad instalada requerida es de aproximadamente 78 a 720 GW, con una tasa de crecimiento de fabricación superior al 200%, para producir suficientes electrolizadores que satisfagan la demanda mundial. Esto estableció una relación directa entre la demanda, la producción y los consumidores. A la luz de estos resultados, se recomendó la implementación del hidrógeno verde en Ecuador como una estrategia para diversificar la matriz energética, y se sugirió la implementación de otras metodologías, como el cálculo de meta-regresión, para apoyar la toma de decisiones.

Palabras clave: Energías renovables, Electrólisis de agua, Demanda energética, Sostenibilidad, Transición energética, Descarbonización.

ABSTRACT

Statistics from international cooperation organizations indicate that Latin America has significant potential for hydrogen production as an energy source and challenges in critical sectors such as mobility and electricity generation. Various Latin American countries have recently developed, published, and diversified governmental strategies to promote the development of a hydrogen-based economy. This research aims to analyze the opportunities, challenges, and prospects of the green hydrogen market in Latin America, focusing on public policies, technological infrastructure, and regional cooperation. It combined a meta-analysis with a qualitative approach, using a documentary design supported by a systematic descriptive review. It allowed the integration and analysis of results from multiple studies, providing a more precise and comprehensive estimate of the topic under investigation. The results revealed that green hydrogen production in Latin America is constrained by the available technology, as an installed capacity of approximately 78 to 720 GW will be required, with a manufacturing growth rate exceeding 200%, to produce enough electrolyzers to meet global demand. It established a direct relationship between demand, production, and consumers. Consequently, green hydrogen in Ecuador is advisable to diversify the energy matrix and other methodologies, such as meta-regression analysis, to support decision-making.

Keywords: Renewable energy, Water electrolysis, Energy demand, Sustainability, Energy transition, Decarbonization.



Reviewed by:

Mgs. Jessica María Guaranga Lema

ENGLISH PROFESSOR

C.C. 0606012607

CAPÍTULO I.

ASPECTOS GENERALES DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

La contaminación, el calentamiento y el desarrollo mundial, junto con el aumento constante de la población y la demanda de mejorar el nivel de vida, existen como obstáculos para el futuro del clima. Estas crecientes preocupaciones sobre el cambio climático han impulsado una preferencia por las energías renovables, lo que ha incentivado la reducción de costos y ha generado nuevas tendencias en las políticas y la industria (Cardella et al., 2017).

El compromiso, iniciado en el Acuerdo de París en 2016, es mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de los 2 °C con respecto a los niveles preindustriales. Para mantener el calentamiento global dentro de un aumento de 1,5 °C, será necesario acelerar la transición de los combustibles fósiles a fuentes de energía renovables. La urgencia del compromiso de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero ha obligado a muchos gobiernos a anunciar el objetivo de —cero emisiones netas‡. (Nullis, 2018, Paris Agreement, 2022).

Por este motivo, la economía del hidrógeno verde ha encontrado un fuerte respaldo de las empresas, los gobiernos y las industrias tras los objetivos climáticos del Acuerdo de París. Este tipo de apoyo ha dado lugar al desarrollo de políticas que detallan "hojas de ruta" específicas, identificar oportunidades tecnológicas comunes que se pueden aprovechar, junto con la provisión de programas y estudios para el análisis de las oportunidades comerciales futuras y la dinámica actual de la demanda y el suministro de hidrógeno.

Con base en lo anterior, esta investigación puede ser expuesta de manera genérica como una descripción del mercado del hidrógeno verde en América Latina; identificando los actores clave (consumidores y productores y operadores de plantas y sistemas de electrólisis y fabricantes); proporcionando una visión general y desarrollo de oportunidades de negocios con base en un análisis de las hojas de ruta de cada país (Wappler et al., 2022).

El documento también analiza las estimaciones existentes y futuras de la demanda de hidrógeno verde y de producción de electrolizadores desde una perspectiva de la cadena de suministro de hidrógeno verde. El análisis incluye a productores, clientes, proveedores y la disponibilidad de energía renovable en países latinoamericanos, con un enfoque específico en Argentina, Brasil, Chile, Colombia y México (Muñoz, J.; Beleño & Díaz, 2022). La revisión de la literatura cubre los análisis necesarios de cada país, centrándose en las hojas de ruta, la producción de electrolizadores de agua y un análisis de los proyectos de hidrógeno verde en curso (Chopra, 2019).

1.2. Planteamiento del Problema y Justificación

El hidrógeno limpio y de bajo coste se ha convertido en una pieza clave como sustituto competitivo de los recursos energéticos fósiles. Por ello, muchos estudios han

centrado su atención en las tecnologías del hidrógeno, especialmente en tres etapas críticas: primero, el periodo anterior al uso masivo de combustibles fósiles y sus impactos; segundo, el descubrimiento de métodos de transformación y combinación química, lo que resultó en la clasificación del hidrógeno según su fuente; y tercero, la adopción y especialización en energías renovable como una opción viable para un combustible limpio (Abe et al., 2019).

En la década de 1970, en el marco de la crisis del petróleo, el planeta entero se encontraba en búsqueda de soluciones substitutivas debido a que posiblemente existiera carencia de petróleo y a las dificultades del medio ambiente. Se desarrollaron programas de investigación e iniciativas sobre el hidrógeno, lo que dio origen a la llamada "economía del hidrógeno". Los esfuerzos no tuvieron mucho efecto en la "economía" ni en las opciones de estilo de vida, ya que se fueron descubriendo nuevos yacimientos de petróleo, lo que provocó una caída gradual de los precios del crudo (Sarkar & Seo, 2021b).

El cambio hacia una economía basada en el hidrógeno verde no es una característica exclusiva de América Latina, sino un fenómeno global que avanza en términos de descarbonización y sostenibilidad energética. Ya se están definiendo estrategias en países europeos, asiáticos y norteamericanos para generar y utilizar hidrógeno verde, con el fin de dejar de depender de combustibles fósiles y cumplir con los acuerdos de París. (Sadik-Zada, 2021). Esta iniciativa a nivel global ha sido suministrada por políticas tanto nacionales como internacionales de las cuales exploran un cambio dentro del sector energético usando al hidrógeno como un indicador crucial para la transición hacia las energías limpias (Noussan et al., 2020).

Sin embargo, América Latina enfrenta dificultades particulares en esta operación, ya que, a pesar de contar con excelentes fuentes renovables como la solar y la eólica, las condiciones para fabricar y distribuir hidrógeno resultan difíciles, la infraestructura existente es insuficiente, la falta de políticas públicas coherentes y financiamiento accesible para grandes proyectos, la marginación de la tecnología y una inversión muy limitada en investigación y desarrollo en comparación con otras regiones del mundo, todo lo cual agrava aún más la situación y pone en serio riesgo su capacidad de competir en el emergente mercado global del hidrógeno. (Gischler et al., 2023, Macedo et al., 2023).

En Chile, Brasil y Colombia, algunos países de la región han comenzado a establecer hojas de ruta para el desarrollo del hidrógeno verde con estrategias nacionales que apuntan a utilizar los recursos renovables disponibles no solo para satisfacer la demanda interna, sino también para convertir a la región en un actor importante en el mercado internacional del hidrógeno verde; sin embargo, el funcionamiento de estas iniciativas dependerá en gran medida de si estos países son capaces de superar las barreras mencionadas anteriormente y desarrollar la infraestructura adecuada, atraer inversiones y realizar una cooperación regional para consolidar una economía del hidrógeno sostenible. (Chávez-Ángel et al., 2023).

En otro orden de cosas, si bien América Latina tiene un gran potencial para el desarrollo del hidrógeno verde, tiene grandes dificultades que demandan una articulación a

nivel regional y global, donde el establecimiento de buenas políticas públicas sumada a inversiones en infraestructura y cooperación internacional serán claves para que la región aproveche al máximo las oportunidades que presenta la transición energética global. Las crecientes preocupaciones sobre el cambio climático, así como las diversas crisis económicas y financieras, destacaron nuevamente la importancia del hidrógeno en las décadas de 1990 y 2000.

Uno de los dilemas más espinosos para la Organización Mundial de la Salud es sopesar los riesgos para la salud derivados de la contaminación ambiental, en particular la elevada carga de morbilidad y mortalidad asociada a la contaminación del aire. En 2019, el 99% de la población mundial vivía en lugares donde no se cumplían las normas. (OMS, 2022).

Se estima que cada año se producen 6,7 millones de muertes prematuras, de las cuales aproximadamente 4,2 millones son causadas por la contaminación del aire exterior y del hogar, junto con otros contaminantes ambientales. Esta cifra, por ejemplo, alcanzó su punto máximo en 2019, cuando las regiones de Asia y el Pacífico occidental registraron las tasas más altas: el 89 % se produjo en países de ingresos bajos y medios.

Algunas de las principales fuentes de contaminación atmosférica urbana pueden reducirse mediante políticas e inversiones que fomenten el uso de modos de transporte menos contaminantes, así como una mayor eficiencia y una mejor gestión de los residuos municipales. Esto daría lugar a una menor morbilidad y mortalidad debidas a la contaminación atmosférica. Ante la amenaza del calentamiento global y los efectos nocivos de la contaminación del aire en un asombroso 90% de la población, muchas regiones están abogando actualmente por la protección del medio ambiente y la reducción del CO₂, lo que ha dado lugar a varios proyectos centrados en la aplicación de estrategias en el sector del transporte, que representa el 23% de la cuota total de dióxido de carbono emitido en todo el mundo. (OMS, 2022).

En América Latina, el sector del transporte es la principal fuente de emisiones de dióxido de carbono en las actividades energéticas, contribuyendo con el 35% del total. (ODS, 2018).

Según el Atlas Global del Carbono, entre los 15 principales emisores de dióxido de carbono del mundo sólo hay dos países latinoamericanos, y son México y Brasil. Las emisiones de CO₂ de los combustibles fósiles fueron las protagonistas de esta Cumbre Mundial sobre el Clima (COP 25) en Madrid, logrando el compromiso de 200 países de establecer metas más estrictas de reducción de emisiones. El informe de BP Statistical Review of World Energy también menciona que, en 2018, el 2,7% de las emisiones globales fueron aportadas por Brasil y México al emitir 905 millones de toneladas de CO₂. Tanto Colombia como Perú duplicaron sus emisiones de CO₂ en la última década, aunque la contaminación es menor en comparación con los otros dos. La importancia de abordar las

emisiones de dióxido de carbono en América Latina para reducir la contaminación atmosférica y sus efectos en la salud pública se destaca en estos datos. (Naranjo, 2019).

A su vez, el hidrógeno está ganando la percepción de ser un elemento clave en las naciones y agencias intercontinentales (Esily et al., 2022). De esta manera, la percepción del mercado del hidrógeno será inminente en los sentidos más importantes. Dado que las principales economías de América Latina están estableciendo con fuerza políticas y hojas de ruta específicamente para el hidrógeno, con el fin de escrutar las perspectivas que traerá una economía de tendencia, surge la pregunta: ¿Qué oportunidades y desafíos enfrenta el desarrollo del mercado de hidrógeno verde en América Latina y de qué manera las políticas públicas y la innovación tecnológica pueden influir en dicho proceso?

Esta pregunta surge a raíz del creciente interés y uso del hidrógeno verde en la zona como fuente de energía limpia orientada a reducir las crisis ambientales, la escasez de combustibles además del aumento progresivo de los precios de los mismos. La influencia del mercado del hidrógeno en las perspectivas de cumplimiento de los objetivos del cambio climático es crucial para caracterizar el estado actual del hidrógeno y, a través de sus proyectos, definir el papel que esta fuente de energía puede desempeñar en la mitigación de los impactos ambientales y en la transición hacia un vector energético más limpio (OECD et al., 2022).

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Analizar las oportunidades, desafíos y perspectivas del mercado de hidrógeno verde en América Latina, con un enfoque en las políticas públicas, la infraestructura tecnológica y la cooperación regional.

1.3.2. Objetivo Específicos

- Caracterizar la situación actual del mercado de hidrógeno en América Latina, identificando los principales actores y sectores involucrados.
- Describir los proyectos existentes y en desarrollo vinculados a la producción de hidrógeno verde mediante electrólisis de agua en América Latina, incluyendo sus desafíos tecnológicos y financieros.
- Analizar las políticas públicas y estrategias nacionales que influyen en el desarrollo del mercado de hidrógeno verde en América Latina, identificando las mejores prácticas y áreas de mejora.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Estado del Arte

En primer lugar, Wappler (2022) postula que la construcción del mercado de hidrógeno verde requiere un análisis exhaustivo del estado actual y las perspectivas de la demanda de hidrógeno verde, así como de la fabricación de electrolizadores, para alcanzar los objetivos climáticos y la meta de "Net Zero" para 2045. A partir de estudios publicados y hojas de ruta de diferentes países, Wappler lleva a cabo una revisión sistemática conjunta. Como resultado, es posible comprender cómo se compara la demanda anticipada de hidrógeno verde con las capacidades de producción de electrolizadores y proyectos específicos. Esto permite identificar posibles escenarios de expansión del mercado y evaluar la viabilidad de satisfacer las previsiones de demanda (Wappler et al., 2022).

En consonancia con esta visión, el estudio de Pan (2023) enfatiza el mercado de hidrógeno verde a través de la programación robusta adaptativa de un sistema híbrido hidro/fotovoltaico/almacenamiento por bombeo en los mercados diarios de electricidad e hidrógeno. El propósito de la presente investigación consiste en proponer un modelo de programación destinado al comercio de energía eléctrica de alta energía renovable (HEGS) en los mercados de electricidad de día siguiente. Dicho modelo tiene como finalidad optimizar la utilización de fuentes de energía renovable, al mismo tiempo que busca incrementar la eficiencia económica en dicho contexto. Los autores obtienen resultados numéricos que indican que el comercio de HEGS en dos mercados genera una ganancia mucho mayor en comparación con el comercio solo en el mercado de electricidad.

Siguiendo esta línea, Viteri (2023) realizó una revisión sistemática sobre hidrógeno verde para comunidades fuera de la red, con el objetivo de identificar sus ventajas, limitaciones y barreras para su adopción generalizada. Utilizando un enfoque bibliométrico cuantitativo y el marco de las cuatro esquinas de Dawood, que clasifica la investigación en producción, almacenamiento, uso y seguridad, Viteri concluye que el hidrógeno verde es una alternativa energética viable para comunidades desfavorecidas.

Por otro lado, Genovese (2023) aborda el mercado del hidrógeno verde desde una perspectiva industrial, centrándose en las tecnologías —power-to-hydrogen‖ e —hydro-to-X‖ para la industria del futuro en Europa. En este trabajo se analiza el papel de estas tecnologías en los sistemas energéticos actuales y futuros, con especial énfasis en el contexto europeo. Genovese aborda el hidrógeno como un vector energético flexible, que juega un papel importante al permitir la explotación de energía con poco o ningún impacto ambiental, una situación propia de sectores hasta ahora basados en el uso de combustibles fósiles.

Además, Zhang (2022) presenta una estructura de financiación para la industria verde de hidrógeno, con el fin de financiar de manera financiera la popularización de esta fuente de

energía. Zhang propone el concepto de "crédito de hidrógeno" y un marco de comercio de créditos similar a los créditos de carbono, demostrando su viabilidad y eficiencia a través de estudios de caso. Los resultados sugieren que este marco podría proporcionar incentivos significativos para catalizar el mercado de hidrógeno.

En este contexto, Li (2022) se basa en una hoja de ruta estratégica de demostración y comercialización a gran escala para el hidrógeno verde en China. Li utilizó el método Delphi y el análisis FODA para encuestar a expertos en energía del hidrógeno con el fin de cerrar las brechas críticas en la transición al hidrógeno verde con bajas emisiones de carbono. Vamos a desarrollar una hoja de ruta de tres etapas para implementar y comercializar el hidrógeno verde en China.

Asimismo, Pingkuo y Xue (2022) realizan un estudio comparativo multidimensional que pone de manifiesto las similitudes y disparidades en el desarrollo de la energía del hidrógeno entre las cuatro mayores economías del mundo. En él, se consideran los mercados y las políticas relacionadas con el hidrógeno para demostrar que, si bien cada nación tiene sus propias ventajas estratégicas en el tránsito hacia el hidrógeno, los factores impulsores varían de una nación a otra.

A continuación, Kar (2022) presenta un análisis bibliométrico exhaustivo sobre la investigación en economía del hidrógeno, proporcionando una evaluación cuantitativa de 1,275 artículos publicados en las últimas cinco décadas. Utilizando el índice "Field-Weighted Citation Impact" y herramientas como el visor VOS, Kar ofrece una visión multidisciplinaria sobre la producción, almacenamiento, transporte, aplicación y formulación de políticas públicas para el hidrógeno.

De manera similar, Pastore (2022) discute las cuestiones técnicas, económicas y medioambientales del mercado de hidrógeno en el contexto de la estrategia italiana de hidrógeno. Este análisis crítico integra el enfoque de la curva de aprendizaje con la planificación energética y económica nacional, demostrando que el incumplimiento de los objetivos europeos en la instalación de electrolizadores está asociado a mayores costos de producción y descarbonización.

Finalmente, Reksten (2022) realiza una evaluación sobre la proyección de costos futuros de electrolizadores de agua alcalina y PEM mediante un modelo CAPEX, enfocándose en el tamaño de las plantas y el desarrollo tecnológico. Los resultados muestran reducciones de costos significativas basadas en tasas de aprendizaje, sugiriendo un futuro más accesible para la tecnología de hidrógeno.

En teoría, el trabajo de Joseph Schumpeter sobre innovación y cambio tecnológico sugiere que el desarrollo de tecnologías de hidrógeno verde puede calificarse de —innovación disruptiva, que tiene el potencial de transformar por completo sectores industriales enteros. Alfred Marshall (1890) fundamenta su teoría de las economías a escala en la organización industrial y las estructuras de mercado, explicando cómo los costos de producción del hidrógeno verde podrían reducirse con el aumento de la escala de producción. Arthur Cecil

Pigou (1946) aporta su teoría sobre las externalidades, justificando subsidios o incentivos gubernamentales para el hidrógeno verde por su capacidad de internalizar externalidades positivas. Herman Daly (2022) establece que los mercados competitivos y la transición energética deben centrarse en la sostenibilidad, abogando por el uso de fuentes de energía limpias.

2.2. Marco Teórico

Como indican Berry y Aceves (2006), el hidrógeno ha sido calificado como un portador de energía o un combustible como cualquier otro tipo de portador de energía, por ejemplo, la electricidad; luego debe producirse por electrólisis a través de otra fuente de energía y puede ser combustible fósil, energía nuclear o energía renovable. En comparación con la mayoría de los demás combustibles, el hidrógeno puede producirse y consumirse con bajas emisiones de CO₂, lo que presenta importantes ventajas ecológicas y plantea desafíos básicos para su implementación.

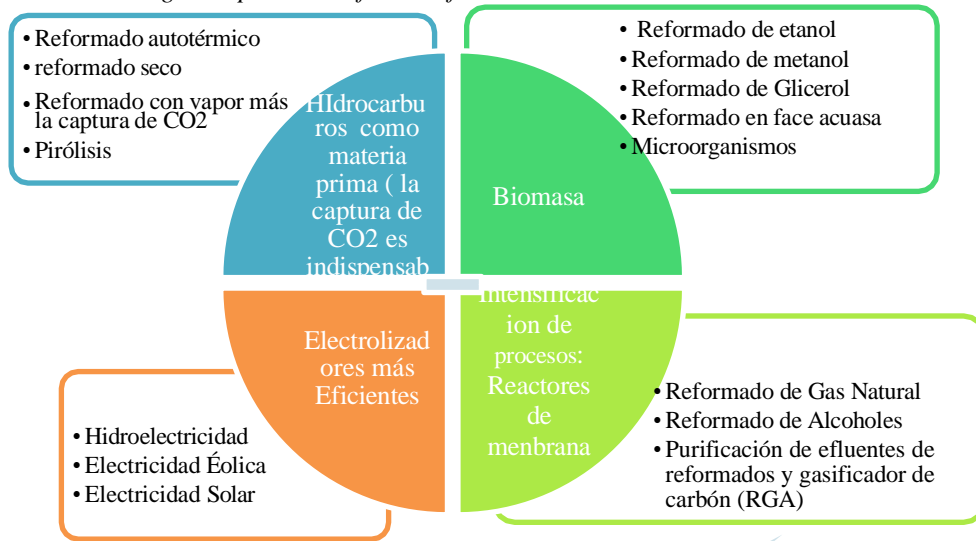
Como insiste Rifkin Harris (2003), el hidrógeno funciona dentro de un ciclo cerrado y sostenible. Debido a su abundancia, pureza e importancia, el hidrógeno se reconoce como un recurso versátil y ampliamente aplicable, al igual que el agua y el oxígeno. Según esta definición, almacena y transporta energía. Si esta producción se realiza a partir de energía solar, o incluso de energía eólica o nuclear, que transforman la luz, el calor o la electricidad, entonces el producto resultante es un medio universal. Y esto es para almacenar y transportar energía en la tierra. Además, la premisa de que en el futuro se establecerá un sistema energético abierto que no contamine el medio ambiente sin gases de efecto invernadero, como el CO₂, etc., contribuye a la reducción de los costos durante la transición energética.

La producción de hidrógeno a partir de hidrocarburos, la captura de CO₂ y electrolizadores más eficientes son áreas importantes en la búsqueda de una producción sostenible de hidrógeno. La biomasa, los reactores de membrana, la intensificación de procesos, el reformado autotérmico, el reformado en seco y el reformado con vapor, todos ellos acoplados a la captura de CO₂, completan el panorama. Otros aspectos incluyen el tratamiento del gas rico en hidrógeno, la separación de CO₂-H₂ y el cambio de la reacción de cambio de agua-gas a procesos con mayor eficiencia.

La investigación y el desarrollo de tecnologías del hidrógeno, distintas de la conversión de hidrocarburos y la electrólisis, abarcan procesos como la gasificación, el pirólisis, la producción hidroeléctrica, la energía eólica y solar, la producción de EtOH, MeOH y glicerol, además de la purificación de residuos de los reformadores y gasificadores de carbón. (Virent Energy, 2010).

Figura 1:

Rutas de producción de hidrógeno a partir de diferentes fuentes.



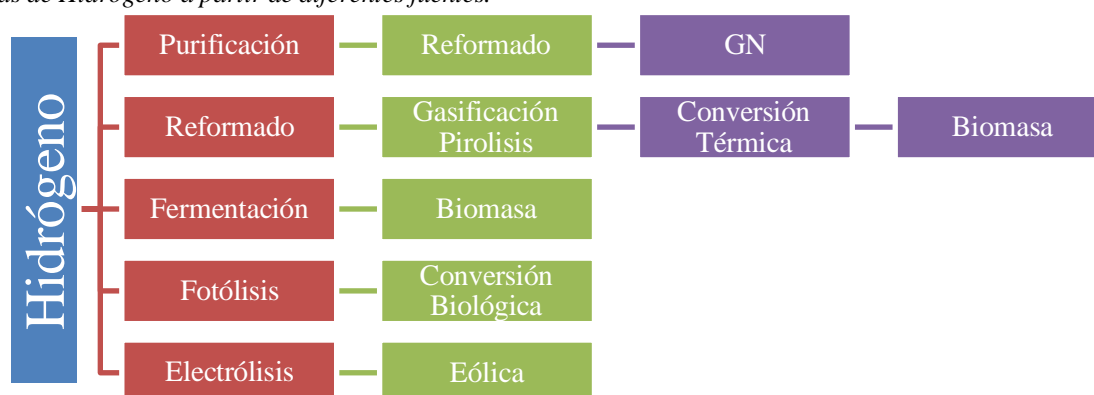
Nota: *Elaboración propia, la figura muestra las rutas de producción de hidrógeno a partir de diferentes fuentes de energía.*

El proceso aún está lejos de implementarse a escala industrial, tanto en la fase de vapor a alta temperatura como en la fase líquida a alta presión. Aunque la gasificación de biomasa ha encontrado aplicaciones industriales a ciertas escalas, está seriamente limitada debido a su baja eficiencia energética. Para garantizar la continuidad en el funcionamiento del sistema, sería necesario emplear unidades de gran tamaño y establecer una logística eficiente para el suministro de biomasa.

En términos de condiciones tecnológicas, el uso de reactores de membrana para la purificación de hidrógeno surge como una opción atractiva. Estos reactores permiten obtener hidrógeno con una pureza del 99,999% en un solo recipiente, lo que no solo reduce significativamente la inversión requerida, sino que también proporciona una mayor flexibilidad para manejar las fluctuaciones de la demanda (Chheda, 2007).

Figura 2:

Rutas de Hidrógeno a partir de diferentes fuentes.



Nota: *Elaboración Propia, la figura muestra la red de producción de hidrógeno por fuentes de energía (CYTED, 2010)*¹.

La desactivación y otros obstáculos importantes se pueden minimizar drásticamente mediante la adopción de nuevos métodos de preparación que se centren en la síntesis de nanopartículas y un mejor control de la distribución del tamaño. Las pruebas de ampliación de la escala de los catalizadores y el desarrollo de prototipos son partes integrales de estos proyectos que pueden tener el potencial de reducir los costos de producción y facilitar la aceptación de nuevas tecnologías. La conversión de biomasa y el etanol y otros biocombustibles líquidos a partir de biomasa son los procesos que más rápido están creciendo porque no están recibiendo mucho interés. Además, procesos como el reformado en fase acuosa de la glicerina, un subproducto del proceso de producción de biodiésel, o el reformado de biocombustibles a partir del pirólisis rápido de biomasa, están ganando impulso como rutas alternativas para la producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables (Chheda, 2007).

Además, es posible producir hidrógeno mediante la electrólisis del agua. Todo esto se hace mediante electrolizadores a bajas temperaturas con un electrolizador alcalino, PEM o de óxido sólido como en el proyecto GrinHy2.0. La electrólisis a alta temperatura tiene muchas aplicaciones potenciales cuando se combina con procesos industriales, especialmente si se puede aprovechar el calor residual para lograr procesos que sean muy eficientes. La electrólisis es actualmente uno de los principales obstáculos, ya que contribuye solo con el 2% de la producción total mundial de hidrógeno.

¹ El programa CYTED fue creado en Madrid, España en 2010, como una iniciativa intergubernamental de cooperación en ciencia y tecnología aplicada a las cadenas de suministro de hidrógeno. Este programa tiene múltiples objetivos de promoción de la cooperación en materia de investigación e innovación para el desarrollo de la región iberoamericana. Más de 200 investigadores de Argentina, Bolivia, Brasil, Costa Rica, Colombia, Cuba, Chile, España, México, Portugal y Venezuela participan en este proyecto con el objetivo de establecer mecanismos de cooperación entre grupos de investigación de universidades, centros de investigación y empresas innovadoras orientados al desarrollo armónico de la región iberoamericana.

Tabla 1:

Métodos de producción de hidrógeno y sus colores

Métodos de Producción de Hidrógeno y sus colores			
Fuente	Método de producción de Hidrógeno	Emisiones	Color
Carbón	Gasificación	CO2	
Gas Natural	Reformado de Metano con Vapor y Gasificación	CO2 Capturado y almacenado	
Gas Natural	Reformado de Metano con Vapor	CO2	
Energía Nuclear	Electrólisis	Residuos Nucleares	
Energías Renovables	Electrólisis	O2	

Nota: *Elaboración Propia, la tabla muestra los métodos de producción mediante su materia prima de transformación para la obtención como resultado el hidrógeno por colores.*

Sin embargo, esta situación está cambiando drásticamente, ya que la tecnología de electrólisis se encuentra en pleno desarrollo para cumplir con los objetivos de reducción de emisiones (CIC, 2023). La colaboración más reciente entre Iberdrola y Fertiberia para la producción de hidrógeno verde para la producción de amoníaco es un claro ejemplo de ello. Iberdrola va a construir una planta fotovoltaica de 100 MW, una instalación de baterías y un sistema de electrólisis de membrana de electrolito polimérico para producir hidrógeno verde mediante la electrólisis de fuentes 100% renovables. La planta de fertilizantes de Fertiberia en Puertollano será la primera en utilizar grandes volúmenes de este hidrógeno verde, lo que la convierte en la primera empresa europea de su sector con experiencia a gran escala en la producción de amoníaco verde.

Al hablar de la producción de hidrógeno, conviene tener en cuenta los diferentes "colores" del hidrógeno, clasificaciones que reflejan los métodos de producción y su impacto medioambiental. En concreto, se considera que el hidrógeno verde se ha producido mediante electrólisis del agua utilizando electricidad procedente de fuentes renovables, mientras que el hidrógeno gris, azul, rosa y negro/marrón indican diversos métodos de producción, por lo que tienen sus consecuencias medioambientales específicas (CIC, 2022).

Por otra parte, el hidrógeno es un portador de energía limpia y no contamina el medio ambiente, lo que puede contribuir a que el clima y la atmósfera no sigan deteriorándose.

2.2.1. Características del mercado hidrógeno verde

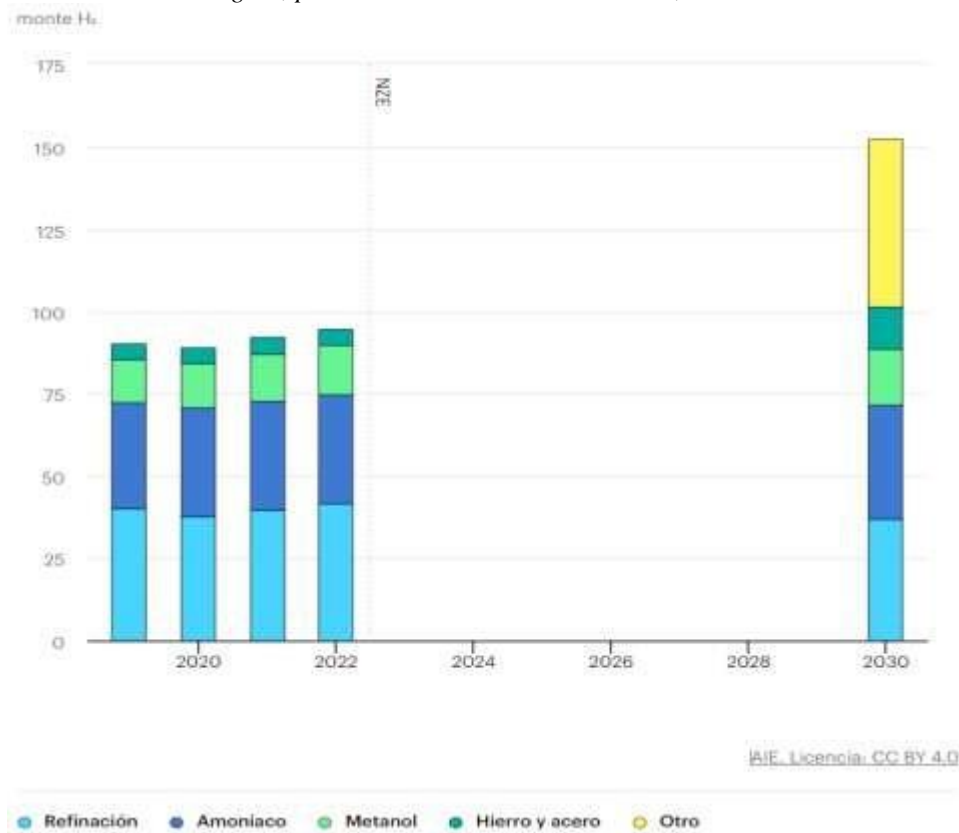
La Agencia Internacional de Energía (AIE, 2022) distingue varias particularidades en las investigaciones sobre el hidrógeno verde, comenzando por caracterizar el mercado, la cadena de suministro y la producción. Al comparar estas características con las de otros países a nivel mundial, se destacan los siguientes aspectos:

- En 2021-2022, nueve países, que cubren alrededor del 30% de las emisiones mundiales del sector energético, publicaron sus estrategias nacionales para el hidrógeno verde.
- La adopción de tecnologías más limpias ha provocado un notable incremento en la demanda de hidrógeno y los combustibles basados en hidrógeno eviten las emisiones de aproximadamente 60 gigatoneladas de CO₂ entre 2021 y 2050.
- En el contexto de alcanzar cero emisiones netas, se ha determinado que el hidrógeno contribuye con el 6% de las reducciones totales acumuladas de emisiones.
- Asimismo, el hidrógeno busca optimizar la protección ambiental, mejorar la seguridad energética, transformar los sistemas energéticos globales, gestionar la red de manera más eficiente y promover el desarrollo económico internacional, además de servir como un recurso global principal.
- Si todos los proyectos enumerados llegan a buen puerto, los niveles anuales de producción de hidrógeno de bajas emisiones podrían superar los 24 millones de toneladas. Probablemente más de dos tercios de la electrólisis y la producción se realizan en la UE, el tercio restante procede de importaciones de la UE producidas a partir de combustibles fósiles con CCUS.
- En 2021, el gas natural y el carbón representaron alrededor del 30% y el 70% de la demanda energética para la producción de hidrógeno mediante el proceso de reformación de metano con vapor.
- Se prevé que en 2030 alrededor del cuarenta por ciento de la necesidad energética mundial, es necesario que la producción de hidrógeno sea alimentada con electricidad.

- Actualmente, los electrolizadores alcalinos y los electrolizadores de membrana de intercambio de protones (PEM) se encuentran disponibles en el mercado para su uso en tecnologías de electrólisis.
- En febrero de 2022, el Suiso Frontier, un buque cisterna de hidrógeno licuado desarrollado por Kawasaki Heavy Industries, completó el primer envío de hidrógeno entre Australia y Japón.
- Como se describe en los compromisos de descarbonización y los métodos alternativos de uso distribuido que resultan en un aumento de la demanda de hidrógeno, es necesario desarrollar una infraestructura de hidrógeno que conecte los centros de producción y demanda.
- La eficiencia energética, el cambio de comportamiento, la electrificación, las energías renovables, el hidrógeno y los combustibles basados en hidrógeno, junto con la captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) son fundamentales para el Hidrógeno verde en América Latina

Figura 3:

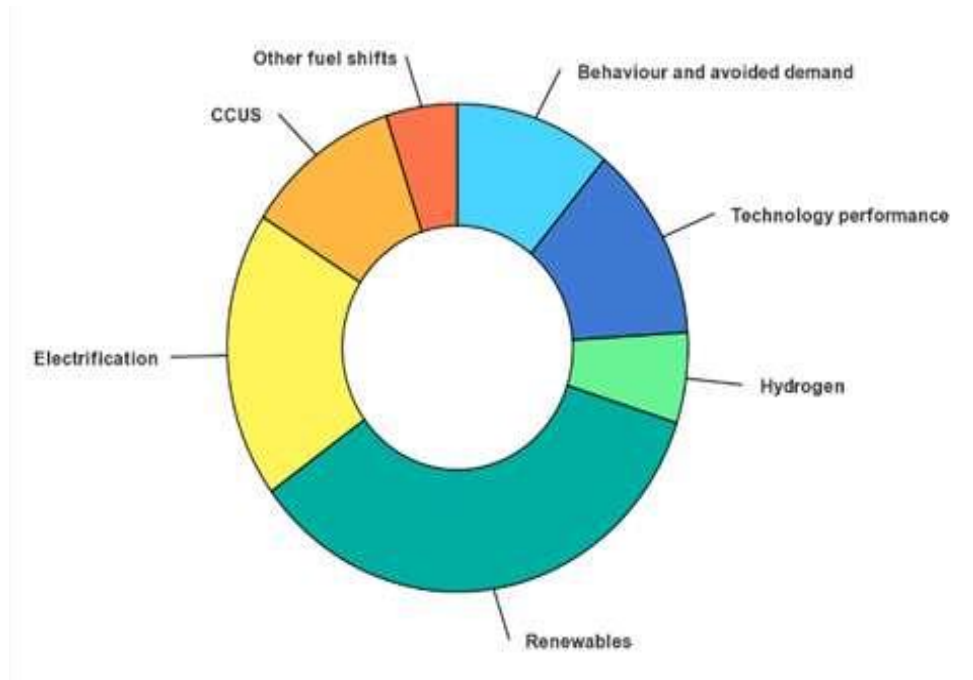
AIE, Demanda mundial de hidrógeno, por sector en el escenario cero neto, 2019-2030



Nota: la figura representa la demanda mundial de hidrógeno, creció alrededor del 3% en 2022, pero aún sigue concentrada en aplicaciones tradicionales con lenta penetración en nuevos usos. Tomado de la Agencia Internacional de Energía (AIE, 2022).

Figura 4:

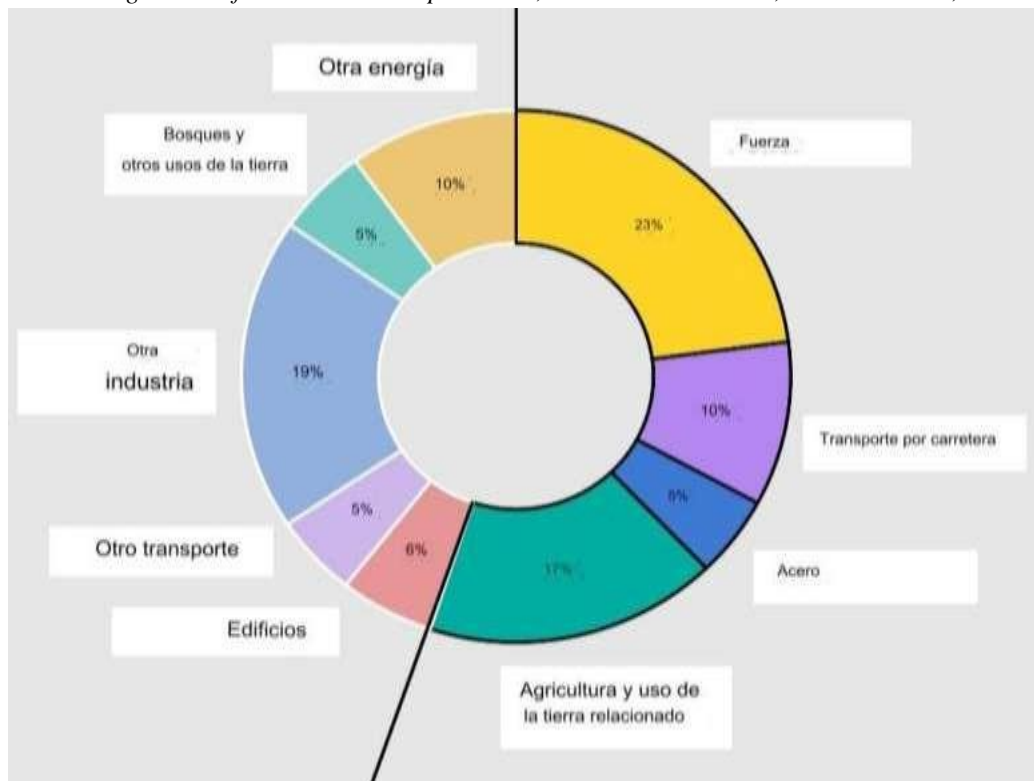
AIE, Reducción acumulativa de emisiones por medida de mitigación en el Escenario Cero Neto, a nivel mundial 2021-2050



Nota: la Figura representa la reducción acumulativa de emisiones por medida de mitigación en el Escenario Cero Neto, a nivel mundial 2021-2050 (AIE, 2022).

Figura 5:

AIE, Emisiones de gases de efecto invernadero por sector, Escenario Cero Neto, a nivel mundial, 2019.



Nota: la acción en los cinco sectores para los cuales los signatarios han acordado hasta ahora objetivos en el marco de la Agenda Avance (energía, hidrógeno, transporte por carretera, acero y agricultura) (AIE, 2022).

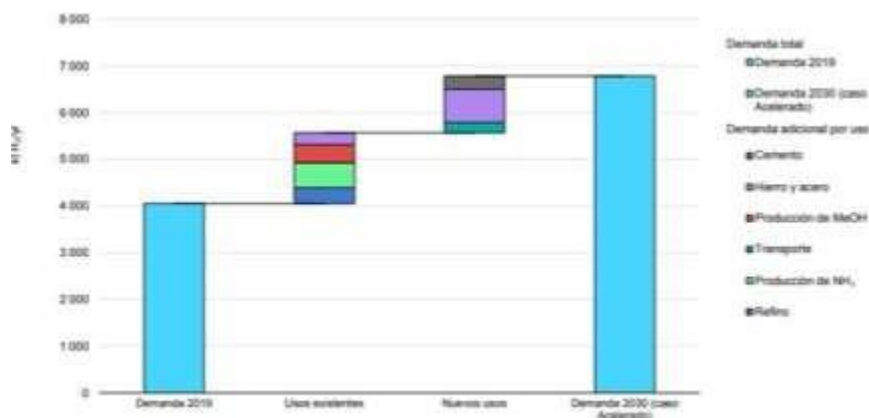
2.2.2. Hidrógeno verde en América Latina

Considerando lo expuesto por la Agencia Internacional de Energía (AIE, 2022), la presencia del hidrógeno verde en América Latina presenta ventajas significativas en términos de producción y comercialización, lo que le permite ser competitivo y sostenible en el mercado global. Estas ventajas se fundamentan en las siguientes características:

- Argentina, Brasil, Chile, Colombia y México han elaborado "Roadmaps" o estrategias a largo plazo para el periodo 2030-2050.
- Cada nación puede, por tanto, diseñar su propio rumbo teniendo en cuenta las necesidades y prioridades a largo plazo utilizando el hidrógeno como portador energético, aprovechando al mismo tiempo sus beneficios estratégicos y las cadenas de valor industriales, los potenciales tecnológicos y las infraestructuras que ya existen.
- En concreto, el hidrógeno bajo en carbono se destaca como uno de los elementos que permitirán el inicio de nuevos negocios a largo plazo, lo que a su vez contribuye a una reducción significativa de las emisiones.
- Más concretamente, se esperan aplicaciones interesantes en la industria y el sector del transporte, dadas las pocas alternativas técnicas para la eliminación de carbono.
- La zona cuenta con tecnologías sostenibles y una abundante disponibilidad de energía renovable, lo que facilita la producción de hidrógeno verde.
- Las abundantes y competitivas fuentes de energía renovable sitúan a algunos países latinoamericanos en condiciones de producir más hidrógeno bajo en carbono del que puede absorberse a nivel nacional.
- La creación de cadenas de valor para la producción de equipos como electrolizadores y pilas de combustible resulta en una reducción de los costos de fabricación. Asimismo, genera empleo altamente calificado y nuevas oportunidades económicas para la región.

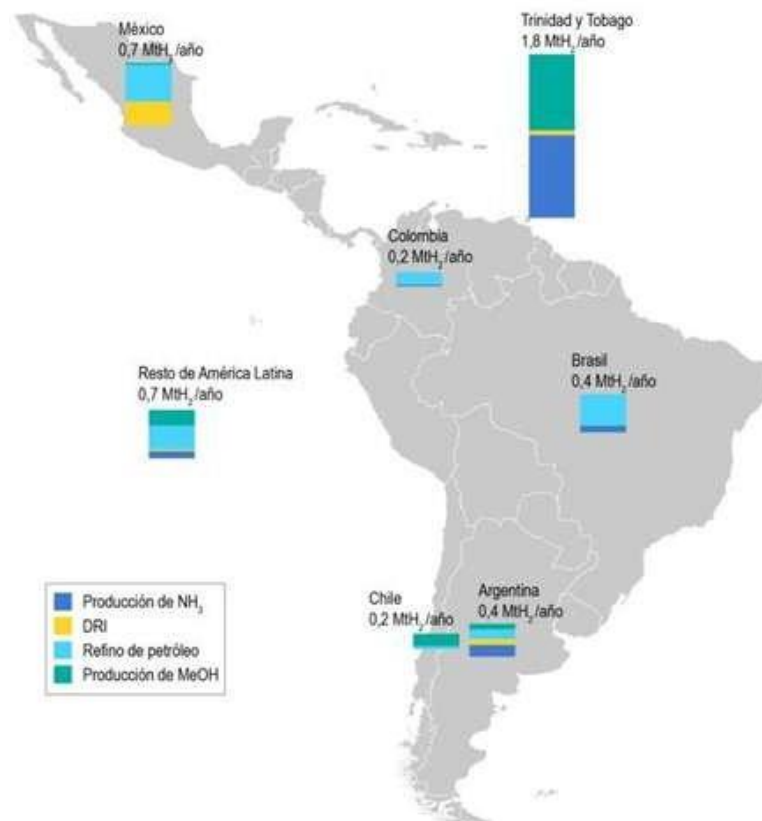
Figura 6:

AIE, Cambios en la demanda de hidrógeno por sector, caso Acelerado, América Latina, 2019- 2030.



Nota: basado en las estadísticas de la AIE.

Figura 7:
Demanda de hidrógeno en América Latina, 2019



Nota: El caso acelerado recoge una visión optimista del despliegue de las tecnologías de uso final del hidrógeno para 2030 (AIE, 2019).

2.2.3. Participación del hidrógeno verde en América Latina

Los gobiernos participantes actuales son los siguientes: Australia, Austria, Brasil, Canadá, Chile, Colombia, México, Argentina, China, Costa Rica, Comisión Europea, Finlandia, Alemania, India, Italia, Japón, Países Bajos, Nueva Zelanda, Noruega, Portugal, Arabia Saudita, Sudáfrica, Corea del Sur, Reino Unido y Estados Unidos. Esto es un reflejo de la importancia de la tecnología del hidrógeno y las pilas de combustible en medio de la transición total hacia la energía limpia a escala mundial. La iniciativa involucra a varios socios en diversas actividades, incluyendo:

Iniciativas:

1. El Consejo del Hidrógeno y la Asociación Internacional para el Hidrógeno y las Celdas de Combustible en la Economía son dos organizaciones relevantes en el ámbito de la energía.
2. Programas de Colaboración Tecnológica sobre Celdas de Combustible y Tecnología del Hidrógeno de la IEA, Misión Innovación.
3. Foro Económico Mundial, Air Products, Ballard, Enel, Engie, Nel Hydrogen, Puerto de Róterdam y ThyssenKrupp.

La CEM H2I convocó la 10ª Reunión Ministerial de Energía Limpia. Se trata de una iniciativa voluntaria multigubernamental de conformidad con el Documento Marco de la CEM y diseñada para promover políticas, programas y proyectos que aceleren la comercialización y la implementación de tecnologías basadas en el hidrógeno y pilas de combustible en diversos sectores de la economía. La iniciativa opera bajo los auspicios de la Ministerial de Energía Limpia (CEM), involucrando acuerdos no vinculantes entre los ministerios gubernamentales nacionales participantes.

En este contexto, el CEMH2I ejecutará una colaboración que se intensifica en la ejecución de proyectos, programas y políticas para promover la comercialización de las tecnologías de hidrógeno y de pilas de combustible en todas las áreas económicas. Esto se basa en las sugerencias del meeting ministerial de energía de hidrógeno de 2018 en Japón, donde se destacaban los esfuerzos de colaboración entre naciones que tiraban de las victorias de otras colaboraciones en términos de hidrógeno, por ejemplo, el Desafío del Hidrógeno dentro del marco de la Misión de Innovaciones y el trabajo en curso dentro del marco de la Asociación Internacional de Hidrógeno y Pilas de Combustible para la Economía, basadas en estudios sobre la AIE.

El objetivo principal de esta iniciativa es abordar las barreras e identificar oportunidades para el hidrógeno en la transformación global hacia un sector energético limpio, asequible y confiable, analizando las cadenas de suministro globales de este nuevo vector energético. La iniciativa se centrará en cómo el hidrógeno puede contribuir a sistemas de energía más limpios, promoviendo simultáneamente la sostenibilidad, la resiliencia y la seguridad energética.

El trabajo inicial llevado a cabo a través de la iniciativa se enfoca en tres áreas clave:

- Asegurar la implementación exitosa del hidrógeno en aplicaciones industriales actuales.
- Facilitar el despliegue de tecnologías de hidrógeno en el transporte (por ejemplo, carga, transporte público, tren ligero, transporte marítimo).
- Explorar el papel del hidrógeno para satisfacer las necesidades energéticas de las comunidades (Bermúdez et al., 2019).

Además, los miembros del Clean Energy Ministerial (CEM H2I) han aprobado un ambicioso programa de trabajo para el período 2021-2022, que incluye las siguientes actividades:

- Grupo de trabajo sobre objetivos globales para el hidrógeno.
- Grupo de trabajo sobre la Coalición Global de Puertos.
- Grupo de trabajo sobre la Mesa Redonda para la Región del Noroeste de Europa.
- Grupo de trabajo sobre la cadena de suministro de hidrógeno a gran escala.
- Grupo de trabajo sobre la Iniciativa Ciudades Gemelas H2.
- Actividad de Certificación de Hidrógeno.

- Proyecto estratégico "Hidrógeno en Marina".

2.2.4. Hojas de ruta definición y composición

Una "hoja de ruta" (o *roadmap* en inglés) es una herramienta de planificación estratégica que detalla los pasos, cronogramas e hitos necesarios para alcanzar una meta específica. Su función principal es proporcionar una dirección clara y un marco para la gestión y ejecución de proyectos, especialmente en entornos cambiantes. Entre sus características y beneficios se incluyen:

- Planificación de Alto Nivel: Ofrece una visión amplia de los objetivos sin detallar cada tarea, lo que ayuda a alinear a las partes interesadas y visualizar metas a largo plazo.
- Flexibilidad y adaptabilidad: al no ser cronogramas detallados, las hojas de ruta son flexibles y pueden modificarse en función de nueva información o condiciones del mercado; esto las hace útiles en un entorno donde la agilidad es crucial.
- Herramienta de comunicación: ayuda a comunicarse con todas las partes interesadas para garantizar que todos comprendan la visión, la estrategia y los objetivos del proyecto.
- Entrega de Valor Incremental: Se enfoca en establecer objetivos alcanzables a corto plazo que contribuyan a metas estratégicas mayores, permitiendo mejoras continuas y ajustes basados en retroalimentación.
- Vistas Estratégicas y Tácticas: Algunas hojas de ruta se dividen en versiones estratégicas (objetivos a largo plazo) y tácticas (detalles a corto plazo), equilibrando la visión a largo plazo con la flexibilidad para la ejecución inmediata (Defense Acquisition University, 2008).

En el contexto del desarrollo de tecnologías o políticas, como el mercado del hidrógeno verde, una hoja de ruta cumple varias funciones clave:

- Establece Metas: Define objetivos a corto, mediano y largo plazo.
- Identifica Acciones: Detalla las actividades y proyectos necesarios para alcanzar los objetivos.
- Asigna Recursos: Indica los recursos financieros, humanos y técnicos requeridos.
- Define Cronogramas: Especifica los plazos e hitos importantes para el seguimiento del progreso.
- Monitoreo y Evaluación: Incluye mecanismos para supervisar y evaluar el progreso y el éxito de las acciones implementadas.

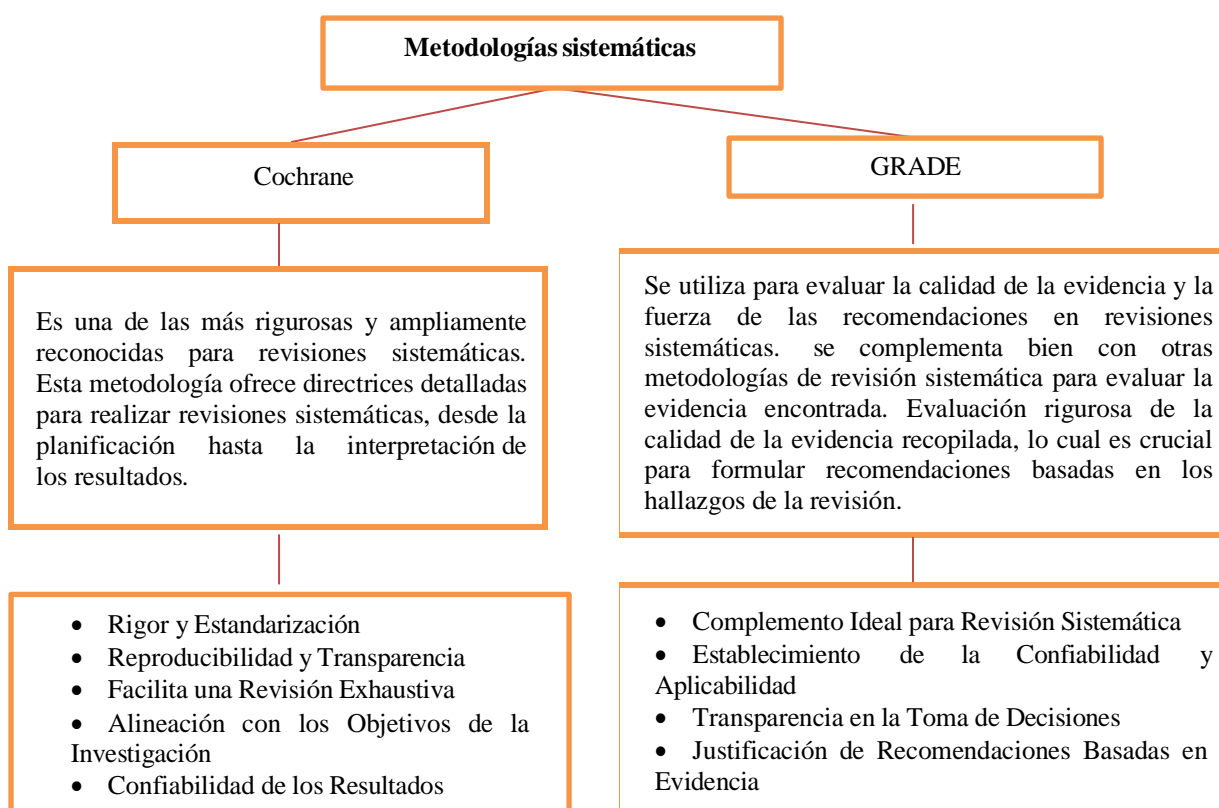
En América Latina, países como Argentina, Brasil, Colombia, Chile y México han desarrollado y formulado planes de acción en materia de hidrógeno verde para implementarlo como bandera de liderazgo en el mercado internacional de energías renovables. Estas medidas, metas de producción, estrategias para aumentar la demanda interna y las exportaciones son parte de esos planes.

El Instituto Interamericano de Desarrollo (IID) está impulsando estos trabajos en la zona, proveyendo asistencia técnica, pruebas piloto, fondos discrecionales y orientaciones para el desarrollo de la industria del hidrógeno verde. Además, países como Uruguay y Bolivia han tomado iniciativas similares, realizando estudios de viabilidad y análisis de cadenas de valor para promover la adopción del hidrógeno verde (Wellenstein, 2021).

CAPÍTULO III. 3. METODOLOGÍA

Este estudio se enmarca dentro de un enfoque cualitativo de tipo documental, basado en una revisión sistemática que emplea una metodología estandarizada conforme a las directrices PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) (Valle et al., 2022). Se trata de un metaanálisis, lo que significa que combina y sintetiza los resultados de más de un estudio, dando una mejor y más completa estimación del tema investigado. El trabajo realiza un análisis de cinco —Hojas de Ruta o Estrategias Nacionales del Hidrógeno de Argentina, Brasil, Colombia, Chile y México.

De cara al hidrógeno verde en América Latina, con varios países trazando hojas de ruta para destacarse como referentes en la producción y exportación de esta fuente de energía limpia, es necesario contar con metodologías rigurosas que permitan una evaluación sistemática y confiable de la calidad de la evidencia disponible. La Metodología Cochrane y la Metodología GRADE son herramientas. La Metodología Cochrane guía la realización de revisiones sistemáticas de manera estructurada, asegurando que la información sobre las hojas de ruta del hidrógeno verde se recopile y analice de manera integral y transparente. En este sentido, la Metodología GRADE vincula tanto el proceso como la calidad de la evidencia y los niveles de fuerza de las recomendaciones, críticos para la generalización y aplicabilidad de los resultados en diferentes contextos de desarrollo energético dentro de la región. Las dos metodologías cuando se utilizan al unísono facilitan la evaluación integral y crítica de los planes de desarrollo para garantizar que la toma de decisiones se realice sobre la mejor evidencia disponible (Higgins & Green, 2011; Kirmayr et al., 2021).



3.1. Diseño de la Investigación

El análisis realizado en este estudio forma parte de una revisión cualitativa, que presenta evidencia de forma descriptiva y sin estadisticidad mediante el análisis estadístico tradicional. El diseño es no experimental ya que no manipulamos las variables; se basan en la recolección y evaluación de documentos originales, revisiones, —Road Maps, artículos científicos y literatura gris (Arispe et al., 2020). Estos últimos incluyen resultados de investigación no publicados en revistas de circulación periódica, como informes técnicos, documentos presentados en ministerios, congresos, parlamentos, estrategias de intervención y reuniones científicas. Este meta-análisis permitió la integración y análisis cuantitativo de los resultados de los estudios seleccionados complementando el enfoque cualitativo para una visión más integral del estado actual de la producción y demanda de hidrógeno verde en América Latina. Este enfoque combinado facilita un análisis detallado y robusto de la información disponible, sin intervención experimental (Botella & Zamora, 2017).

3.2. Estrategias de Búsqueda

La información se buscó a través de varios de ellos como Scopus; Web of Science y bases de datos gubernamentales regionales y organizaciones como IEA, IRENA, Scielo, DIALNET, Redalyc, RIDU y repositorios como Research report, Journal of Critical Economics entre los años 2017 a 2023. Se incluyeron publicaciones entre estos años. La búsqueda estratégica utilizó los términos clave combinados —Mercado actual de hidrógeno verde, —Hojas de ruta en América Latina, —Estrategias de hidrógeno, —Economía del hidrógeno, —Vector energético en América Latina, —Producción de hidrógeno y —Demanda de hidrógeno. Los artículos también se filtraron por idioma (inglés, español).

3.2.1. Criterios de Elegibilidad

Criterios de Inclusión:

Se incluyeron estudios que cumplieron con los siguientes criterios:

- Estudios de diversas instituciones de energía publicados entre 2017 y 2023.
- Hojas de ruta específicas para el hidrógeno en América Latina, publicadas por Argentina, Brasil, Colombia, Chile y México.
- Investigaciones relacionadas con la producción de electrolizadores de agua.
- Estudios de mercado y pronósticos sobre las capacidades de fabricación de electrolizadores.
- Análisis de proyectos de hidrógeno verde en curso y futuros.
- Estrategias nacionales de hidrógeno de los países de Argentina, Brasil, Colombia, Chile y México.
- Proyectos vinculados al desarrollo del hidrógeno como vector energético.
- Publicaciones de la Agencia Internacional de Energía que aborden temas relacionados con el hidrógeno.

- Estudios que presenten datos específicos sobre la producción, demanda y consumo de hidrógeno en el mercado, así como trabajos publicados en revistas científicas indexadas o en repositorios gubernamentales actualizados de cada país.
- Disponibilidad de textos completos.

Criterios de Exclusión:

Se excluyeron los estudios que cumplieron con los siguientes criterios:

- Estudios que no fueran específicamente sobre América Latina (Argentina, Brasil, Colombia, Chile, México).
- Investigaciones que no se enfocaran en el mercado del hidrógeno.
- Textos que fueran incompletos o de dudosa veracidad.
- Trabajos no actualizados o estudios de opinión sin datos cuantitativos confiables.

3.3. Organización de la información:

Una vez obtenidos los artículos, hojas de ruta y proyectos relacionados, se organizó la información utilizando una tabla de extracción de datos estructurada por temas, alineada con los objetivos de la investigación. Esta tabla incluyó las siguientes variables:

Demanda de hidrógeno verde: estado actual y perspectivas

1. Otro se realizó mediante un análisis comparativo de estudios de hidrógeno, evaluando diferentes escenarios y estimaciones de la demanda actual de hidrógeno en millones de toneladas (Mt) para los años 2030 y 2050.
2. Se desarrolló una descripción general de las fechas de lanzamiento de las hojas de ruta nacionales sobre hidrógeno, publicadas entre 2017 y 2023, en los países latinoamericanos seleccionados.
3. Se enumeraron las cinco estrategias de cada país, junto con las respectivas hojas de ruta publicadas en los últimos seis años, incluyendo el nombre de la publicación, la fecha, el tipo de hidrógeno previsto y la estrategia de suministro correspondiente.
4. Otro se realizó mediante un análisis comparativo de estudios de hidrógeno, evaluando diferentes escenarios y estimaciones de la demanda actual de hidrógeno en millones de toneladas (Mt) para los años 2030 y 2050.

Producción de electrolizadores de agua: estado actual y perspectivas

5. Comparar las capacidades instaladas de electrolizadores que serán necesarias para satisfacer la demanda de hidrógeno verde en 2030, con base en diferentes estudios y horas de operación

6. Examinar las inversiones en hidrógeno y los costos de las celdas de combustible relacionadas con la producción de hidrógeno verde.

Análisis de proyectos de hidrógeno verde

7. Proyectos seleccionados por la empresa: hidrógeno verde y más de 100 MW de capacidad de electrolizadores. La información recopilada incluía el nombre del proyecto, la capacidad renovable (fuente de energía), la capacidad de electrólisis disponible en el año (GW), la ubicación, información adicional, el estado del proyecto y la fuente de la información.

Análisis de la fabricación de electrolizadores demandados en el mercado

8. Describa las empresas fabricantes de electrolizadores de agua en general, indicando lo siguiente: nombre de la empresa (tipo de batería), sistema, tecnología utilizada, sede y sitio web.
9. Se desarrollaron escenarios hipotéticos sobre la capacidad instalada en GW, incluyendo:
 - a) Escenario de previsión 1 con el 100% de las capacidades de fabricación utilizadas y desplegadas en 2021.
 - b) Escenario de previsión 2 con el 50% de la capacidad de fabricación utilizada entre 2022 y 2025.
 - c) Escenario de previsión 3 con el 80% de la capacidad utilizada entre 2026 y 2028, desplegada después de 2 años según los tres diferentes escenarios de mercado.
10. Se evaluaron las capacidades instaladas como una oportunidad para la descarbonización del transporte en América Latina.

3.4. Análisis de la Información:

Considerando las características de la investigación, se adoptó un enfoque exclusivamente descriptivo para sintetizar y presentar los datos extraídos sobre el fenómeno del mercado, en relación con las estrategias de cada país basadas en las hojas de ruta de Latinoamérica. Estos datos fueron resumidos y presentados en forma tabular, estratificados por región y características específicas, permitiendo la identificación de patrones y tendencias en los escenarios de pronósticos.

Este enfoque descriptivo permitió una evaluación del tamaño y alcance de los hallazgos necesarios para proporcionar un contexto adecuado sobre la aplicabilidad de la evidencia presentada, lo que facilitó un desarrollo natural del fenómeno estudiado. No se realizaron análisis inferenciales o metaanálisis, ya que el enfoque de la investigación se

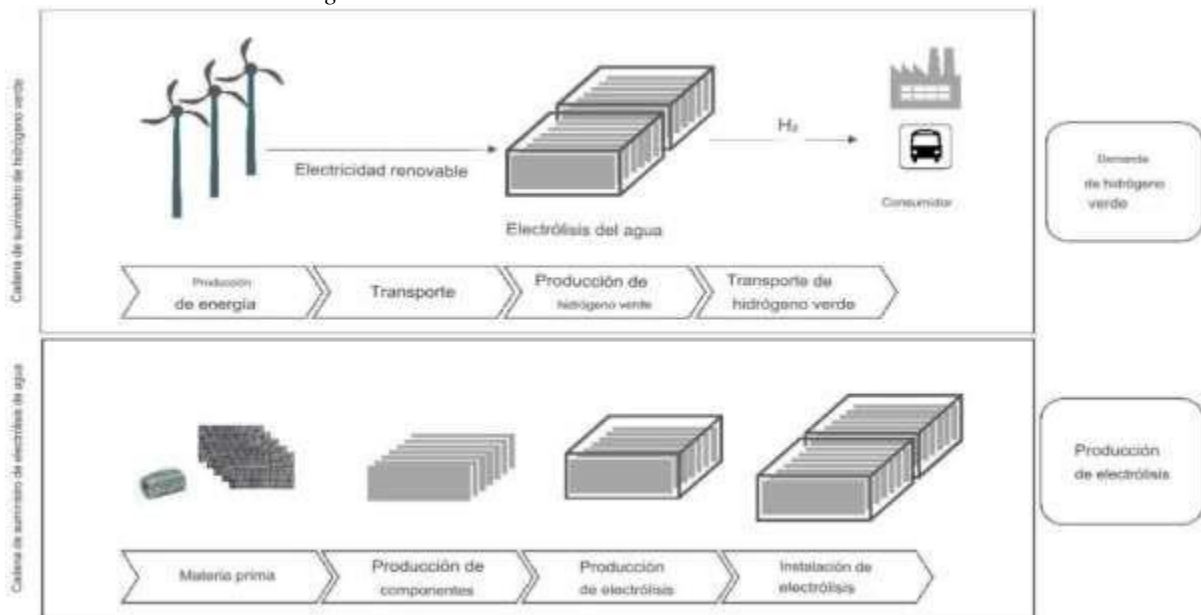
centró en describir la situación a través de la recopilación de información primaria y el análisis del entorno, sin establecer relaciones causales o efectos cuantificables.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Demanda de hidrógeno verde: estado actual y perspectivas

En la actualidad, la demanda de hidrógeno está relacionada principalmente con su producción a partir de combustibles fósiles. Existen varios métodos para la producción de hidrógeno; los procesos y las fuentes de energía empleadas en los métodos los clasifican por analogía de color. Si el tipo de carbón es un parámetro, el hidrógeno procedente de la gasificación del carbón se denomina hidrógeno marrón o negro. El hidrógeno gris se produce de forma similar, pero a partir de gas natural, mediante reformado de metano con vapor. Esta es la fuente más importante en la actualidad para cubrir la demanda de hidrógeno en todo el mundo.

Figura 8:
Ciclo de Producción de Hidrógeno



Nota: Representación esquemática de las dos rutas de la cadena de suministro interconectadas para la producción de hidrógeno verde y la fabricación de electrolizadores de agua. Tomado de Agencia Nacional de Energía, (IEA, 2021).

El hidrógeno también puede ser un subproducto de la producción de sosa cáustica o de la electrólisis cloroalcalina asociada al color blanco. Este hidrógeno suele etiquetarse como de bajo contenido de carbono, y las únicas emisiones de CO₂ que se pueden atribuir a la

huella de carbono de la red eléctrica que alimenta estos electrolizadores. El hidrógeno también puede obtenerse como subproducto durante el reformado con vapor en las refinerías (IEA, 2020).

Desde que el mundo comenzó a fijar objetivos de reducción de emisiones y a impulsar su consecución, han surgido varias tecnologías innovadoras para producir hidrógeno con bajas emisiones de carbono. Dos de las más notables son el hidrógeno azul y el hidrógeno verde. Si bien el hidrógeno azul es un caso particular del hidrógeno gris, derivado del gas natural en el proceso de reformado de metano con vapor, se diferencia del hidrógeno gris en que el dióxido de carbono producido se captura y almacena, en lugar de liberarse a la atmósfera. El hidrógeno verde se produce por electrólisis utilizando agua producida a partir de fuentes de energía renovables. Solo cuando se utiliza energía renovable en el proceso de electrólisis se puede clasificar como hidrógeno verde; cuando se basa en energía nuclear o electricidad de fuentes mixtas, las variedades resultantes se denominan rosa y amarillo. El hidrógeno turquesa se obtiene aplicando también pirólisis al metano.

Excepto por el hidrógeno gris, negro o marrón, los demás tipos de hidrógeno se consideran generalmente como hidrógeno bajo en carbono o limpio (IEA, 2019).

1. Con una producción energética anual donde el 57% corresponde a gas natural, Argentina tiene un gran potencial para impulsar la economía del hidrógeno en todas sus tonalidades, desde el gris hasta el verde. Si bien el país produce actualmente aproximadamente 400 mil toneladas de hidrógeno gris por año, no cuenta con la tecnología necesaria para capturar carbono y disminuir su impacto ambiental. Argentina tiene una base para desarrollar la producción de hidrógeno verde. Ventajas importantes en capacidades productivas: niveles muy altos de radiación solar, que en el noroeste duplica el promedio mundial con 2.800 kWh por año, y gran potencial eólico en la Patagonia. Se ha logrado un aporte significativo al mayor desarrollo y crecimiento económico en estas dos regiones, gracias tanto a las inversiones gubernamentales como a los proyectos internacionales. Sin embargo, el desafío radica en la planificación energética, la formulación de políticas públicas efectivas que destaquen la importancia de los estudios y análisis respaldados por De ahí que el Consejo Económico y Social haya organizado la Mesa Redonda Ministerial sobre Hidrógeno. Estas políticas deben abarcar proyecciones nacionales, tecnologías de producción, almacenamiento, conversión y transporte de hidrógeno, así como análisis de costos y precios que respondan a la demanda global esperada (Beliz & Papa, 2021).
2. Brasil tiene condiciones óptimas para la producción y demanda de energía renovable e hidrógeno verde. La participación renovable del país actualmente se sitúa en el 85%, con un 64% proporcionado por la energía hidroeléctrica y

un 19% de otras fuentes renovables. Brasil emerge como un posible productor y exportador de hidrógeno verde, con una gran demanda interna del mismo en los sectores del transporte y la industria siderúrgica. Según algunas estimaciones, el hidrógeno bajo en carbono podría representar una participación de entre 0,5 y 1,5 millones de toneladas en 2030 (Brasil – H2LAC, 2023). Las aplicaciones del hidrógeno verde en Brasil se encuentran en varios sectores, como la industria siderúrgica, los fertilizantes y el transporte; contando con programas piloto en los que el hidrógeno se mezcla con biocombustibles, por ejemplo, el etanol. Existe mucho interés por parte de la comunidad empresarial sobre el hidrógeno verde, y empresas nacionales e internacionales han mostrado interés en entrar en el mercado brasileño. Los actores clave de la cadena de valor del hidrógeno, como Siemens Energy, ThyssenKrupp, Linde, Messer, MAN, BASF, AirLiquide, AirProducts ya tienen presencia en Brasil con varios proyectos de hidrógeno verde en marcha (Portal do Hidrogênio Verde, 2023).

3. Chile tiene un gran potencial dentro de las obligaciones que se han establecido dentro del proceso de descarbonización, que generará una demanda importante para la energía renovable en distintos puntos. A corto plazo existen oportunidades tales como la producción local de amoníaco en lugar de su importación, así como la sustitución del uso de hidrógeno gris en las refinerías del país. A mediano plazo se estima que podría utilizarse en el transporte de pasajeros y carga a larga distancia en lugar de combustibles líquidos por vía terrestre, y otros combustibles gaseosos en redes de distribución. La inversión en hidrógeno verde (H2V) promoverá el desarrollo de capacidades locales y creará polos de desarrollo a lo largo de todo el territorio con impulso a la vinculación industrial, reconversión productiva y de mano de obra, y la reducción de contaminantes. Los Escenarios estiman que la demanda total de H2V para consumo doméstico oscilará entre 75 y 233 kTon para 2030 y podría alcanzar casi 3.000 kTon para 2050 si se logra una transición energética acelerada (Bachelet et al., 2022). Además, el uso de H2V en aplicaciones domésticas fortalecerá una industria preparada para competir en los mercados internacionales. En el largo plazo, Chile podría pasar de ser un importador a un exportador de energía renovable. Chile podría así pasar de ser un país deficitario en energía a un país con un mayor potencial de crecimiento. Un excedente de energía (Correa et al., 2020). Según un estudio de McKinsey para la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde 2020, la demanda interna de H2V representará el 27% de la producción nacional en 2050, mientras que el 73% se exportará. El desarrollo del sector H2V tiene todos los requisitos para convertirse en un motor de crecimiento para el país: al crecimiento económico tendencial puede contribuir al menos con el 0,4-0,5%, siendo clave para la

descarbonización de la matriz productiva y el logro de las metas de neutralidad de CO₂.

4. Colombia tiene una demanda anual estimada de hidrógeno de 150 kt (kilotoneladas), producida principalmente mediante el reformado de gas natural (hidrógeno gris): se utiliza en gran medida en refinerías. El resto de la demanda se destina a la producción de fertilizantes y otros usos industriales menores (producción de vidrio flotado, procesamiento de grasas y aceites para alimentos) donde también se utiliza hidrógeno electrolítico producido con electricidad de la red eléctrica (Colombia – H2LAC, 2023). De la economía colombiana en transformación y descarbonización a través del hidrógeno: oportunidades para la modernización y desarrollo de múltiples aplicaciones industriales La sustitución de combustibles fósiles en el transporte y la producción de electricidad, es uno de los canales de salida contemplados, al tiempo que se avanza hacia la sustitución de combustibles fósiles en el transporte y la producción de electricidad. Colombia tiene la oportunidad de insertarse en un mercado energético global que contempla las necesidades de los países de su entorno: América Latina y centros importantes de demanda de hidrógeno de bajas emisiones en otros continentes. Es aquí donde el país, con sus competitivos recursos naturales —agua abundante, velocidades del viento superiores al promedio mundial y radiación solar— tiene la primera oportunidad de desarrollar fuentes de energía renovables, como el hidrógeno verde. (Ministerio de Minas y Energía de Colombia, 2020). Desde 2018, Durante la presidencia de Iván Duque, de 50 MW a 1.500: Colombia da —pasos de gigante en energías renovables no convencionales, superando lo pactado en las subastas. También, como resultado de proyectos de autogeneración, y empresas como Ecopetrol y EPM (Ministerio de Minas y Energía de Colombia, 2020).

5. Actualmente, la demanda de hidrógeno en México es inferior a 230 kt/a (kilotoneladas por año), pero se espera un aumento en el mercado global de hidrógeno, lo que brinda mayores posibilidades a los países que producen hidrógeno verde a bajo costo. Se estima que la demanda de H₂V en México comenzará en 2025 y se incrementará a un total de 230 kt en 2030 y 2.700 kt en 2050, con inversiones esperadas en infraestructura dedicada a la producción de hidrógeno que ascienden a miles de millones de dólares (GIZ, 2021). Un análisis ha identificado un potencial exportador de hidrógeno para México. Para producir 60 kt de gas en 2030, con un valor de mercado anual de 330 millones de dólares, se requerirían casi 700 MW de electrólisis. Se mantiene una fuerte relación comercial con naciones que pueden requerir energía para

turbinas de hidrógeno, como Estados Unidos. Además, hay grandes empresas interesadas en fabricar dichos equipos en México, como General Electric y Siemens. La demanda de hidrógeno verde en México hacia 2050 se extenderá a un amplio espectro de aplicaciones, incluyendo la generación de energía eléctrica, el transporte público de pasajeros, el transporte de carga, la inyección en la red de gasoductos, la producción de combustibles sintéticos, la minería, la energía térmica en diversas industrias, y su uso como materia prima química para la refinación, producción de amoníaco y resinas sintéticas, entre otros (GIZ, 2021).

4.2. Análisis de las hojas de ruta de los países latinoamericanos de hidrógeno

Para entender el rol del hidrógeno verde en la región, es muy importante tomar en cuenta las estrategias y planes que los gobiernos de los países latinoamericanos han publicado oficialmente en sus —Hojas de Ruta Nacionales—. La Agencia Internacional de Energía (AIE) ha evaluado las hojas de ruta de cinco países latinoamericanos, ofreciendo avances sumamente esclarecedores en materia de hidrógeno en la región, incluyendo también las estrategias publicadas hasta 2022.

Durante los últimos cuatro años, se han recopilado y analizado documentos que incluyen el nombre de la publicación, la fecha de lanzamiento y el tipo de hidrógeno que se produce, así como las estrategias de suministro de energía vinculadas. Las publicaciones de las "hojas de ruta" se han consolidado a nivel de cada Gabinete de Gobierno Nacional, con la participación de representantes del sector privado, el sector educativo y las instituciones que han trabajado en la actualización y desarrollo de nuevos métodos de innovación para la extracción y transformación de energía limpia en los países analizados: Argentina, México, Brasil, Chile y Colombia.

Debido a las características específicas de los documentos publicados, los sectores objetivo de estas hojas de ruta se centran en una transición energética favorable. Se evalúa la capacidad instalada en cada país para la adquisición de nuevas tecnologías para la producción de hidrógeno y el despliegue de los sistemas de extracción existentes, junto con las perspectivas de crecimiento futuro.

Además, los datos de las hojas de ruta de cada país muestran un potencial significativo. Es precisamente la energía renovable la que ha proporcionado el impulso necesario para lograr la producción de hidrógeno verde requerida por la AIE para satisfacer la demanda mundial y alcanzar el objetivo de cero emisiones netas.

Tabla 2:

Publicación de hojas de ruta o estrategias nacionales: país, producción materia prima, nombre del documento, fecha de publicación.

País	Categoría de producción de	Estrategia de suministro de H ₂	Nombre del documento	Fecha de publicación
------	----------------------------	--	----------------------	----------------------

H2				
Argentina	Limpio	Exportador	Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde	Mayo 2021
México	Verde	Exportador	Hidrógeno verde en México	Octubre 2021
Brasil	Verde	Centro Autosuficiente/Exportador	Línea de base para apoyar la Estrategia Brasileña de Hidrógeno	Febrero 2021
Chile	Verde	Exportador	Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde	Noviembre 2020
Colombia	Limpio	Centro Autosuficiente	Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia	Octubre 2021

Nota: *Elaboración propia, la tabla muestra la determinación, de categorías de hidrógeno, la estrategia con base en el suministro y la publicación del proyecto aplicado en la Agencia Nacional de Energía, (IEA, 2021).*

1. Argentina: En mayo de 2021, Gustavo Beliz, presidente del Consejo Económico y Social, junto con Javier Papa, asesor del Ministerio de Economía y exsubsecretario de Planeamiento Energético de Argentina, impulsaron la evolución de la estrategia del consejo hacia una planificación estratégica en torno al hidrógeno. Esta estrategia busca permitir la captura de carbono y reducir su impacto ambiental, especialmente en los sectores de transporte terrestre y marítimo, mediante una transición de combustibles fósiles a energías renovables, con una visión a largo plazo de exportar esta energía (IEA, Planeamiento energético, 2023b). El foco del hidrógeno en la transición energética global, tal como se delineó durante la reciente gira presidencial por Europa, subraya la relevancia de las acciones propuestas por Beliz y Papa a nivel internacional. El Consejo Económico y Social ha iniciado reuniones y actividades tendientes a articular una Estrategia Nacional del Hidrógeno 2030, ubicando al hidrógeno como política de Estado en la Matriz Energética Argentina (Secretaría de Asuntos Estratégicos Argentina, 2023). Desde la visión de Beliz y Papa, es la planificación estratégica la que permitirá a Argentina aprovechar los beneficios del hidrógeno a nivel nacional y en términos de exportaciones, lo que podría cambiar de manera significativa para la economía y el medio ambiente del país.

HOJA DE RUTA

2. México: En octubre de 2021 se publicó el documento —Hidrógeno verde en México, en el que se agradece el apoyo de la Alianza Energética México-Alemana, el Programa de Apoyo a

la Energía de México y el TrEM. Este documento de estrategia se elaboró con la cooperación del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo de Alemania y la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, y creó la estructura adecuada para la cooperación económica y de desarrollo: —La economía del hidrógeno en México. Con vistas a la exportación de hidrógeno limpio, esta iniciativa podría implicar grandes cosas relacionadas con la manufactura, la mitigación del cambio climático, la creación de empleos y oportunidades de negocios locales e internacionales, así como el fortalecimiento regulatorio y financiero de nuevas capacidades productivas (GIZ, 2021). Se trata de una estrategia que denota el fuerte compromiso de México de adoptar el hidrógeno verde como una fuente principal de energía que puede revolucionar todo lo relacionado con la economía y la sustentabilidad del país.

HOJA DE RUTA

3. Brasil: En febrero de 2021, Brasil publicó el documento —Línea base para apoyar la estrategia brasileña del hidrógeno, en el que se establece como objetivo principal convertirse en un centro de producción de hidrógeno autosuficiente, con una visión de exportación de primer nivel. Esta estrategia se basa en la transición de los combustibles fósiles a la conversión de materias primas mediante fuentes de energía renovables (Ministerio de Minas y Energía, 2021). La neutralidad tecnológica que prefiere la administración brasileña no se limita al hidrógeno verde; se trata de la estrategia del hidrógeno arco iris que persigue todas las capacidades energéticas del país, como la biomasa, la energía eléctrica renovable (como la hidráulica y la solar) y el gas natural (Bautista & Peñuela, 2020). Los fabricantes y la mitigación del cambio climático y la creación de empleo relacionados con las oportunidades comerciales locales e internacionales y el fortalecimiento de las regulaciones financieras y regulatorias pueden verse afectados significativamente por esta estrategia que crea nuevas capacidades productivas en un circuito económico. Este enfoque integral revela la ambición de Brasil de situarse como un actor importante en el ámbito del hidrógeno, alineándose con las tendencias y tecnologías globales de producción de hidrógeno (Bautista y Peñuela, 2020).

HOJA DE RUTA

4. Chile: En noviembre de 2022, Chile publicó su estrategia de hidrógeno, alineada con la Política Energética Nacional actualizada ese mismo año, que establece metas ambiciosas para el sector energético. Estas metas incluyen que para 2050 el sector eléctrico opere con un 100% de energía cero emisiones, y que el 70% de los usos energéticos no eléctricos sean suministrados por combustibles cero emisiones (Gobierno de Chile, 2023). Esta estrategia representa tanto un desafío como una oportunidad para el desarrollo productivo sostenible. A pesar de que la matriz energética chilena está evolucionando rápidamente, con más de la mitad de la generación proveniente de fuentes renovables, el hidrógeno verde es fundamental para concretar la descarbonización de la matriz productiva nacional, con el objetivo de ser uno de los primeros países latinoamericanos en exportar energía limpia (Gobierno de Chile, 2023).

HOJA DE RUTA

5. Colombia: En agosto de 2021, Colombia presentó su estrategia de hidrógeno, actualizada al 1 de octubre de 2021 con la ‘Hoja de Ruta del Hidrógeno’ en marcha. En el marco de esta hoja de ruta se prevén soluciones tanto para el hidrógeno verde en regiones con potencial eólico y solar, como posteriormente para el hidrógeno azul en polos de refinación industrial establecidos (Bautista & Peñuela, 2020). Es necesario invertir una enorme cantidad de dinero, que aún está por determinar, tanto del sector público como del privado para establecer infraestructuras para la producción, el transporte y los usos finales del hidrógeno de bajas emisiones. Se establece con un marco de mecanismos de apoyo atractivo, estable y fiable que brinden esas garantías de servicio para los inversores nacionales y extranjeros, incentivando el desarrollo de proyectos de hidrógeno competitivos y facilitando la búsqueda de acuerdos internacionales que atraigan inversión y capacidades tecnológicas.

- HOJA DE RUTA

Tabla 3:

Esquema de colores, clasificación y capacidades de producción de hidrógeno, con base en procesos de Producción, materia prima o fuente de energía

País	Fuente	Método	Color	Clasificación	Producción H2 % 2019
Argentina	Energía Renovable/ Gas Natural	Electrolisis del agua	azul H2, gris H2, verde H2	baja huella de carbono	0,4 % Mt H2/año
México	Gas Natural/ Energía Renovable	Electrolisis de agua	Gris H2, verde H2	alta huella de Carbono	0,7 % Mt H2/año
Brasil	Energía Nuclear/ Energía Renovable	Electrolisis de agua	Gris H2, verde H2	baja huella de carbono	0,4 % Mt H2/año
Chile	Energía Renovable	Electrolisis del agua	verde H2	Limpio	0,2 % Mt H2 / año

Nota: *Elaboración propia, la tabla muestra la clasificación, métodos de transformación, como resultado en su color bajo la clasificación de contaminación y su nivel de producción de hidrógeno en América Latina.*

4.3. Producción de electrolizadores de agua estado actual y perspectivas

Un análisis de este tipo de la cadena de suministro de hidrógeno verde dependería de la capacidad instalada de energía renovable necesaria para sustentar su producción. Según las

investigaciones, el consumo mundial de hidrógeno verde en 2020 fue de 0,3 GW, lo que subraya la necesidad urgente de implementar tecnologías avanzadas para la producción de

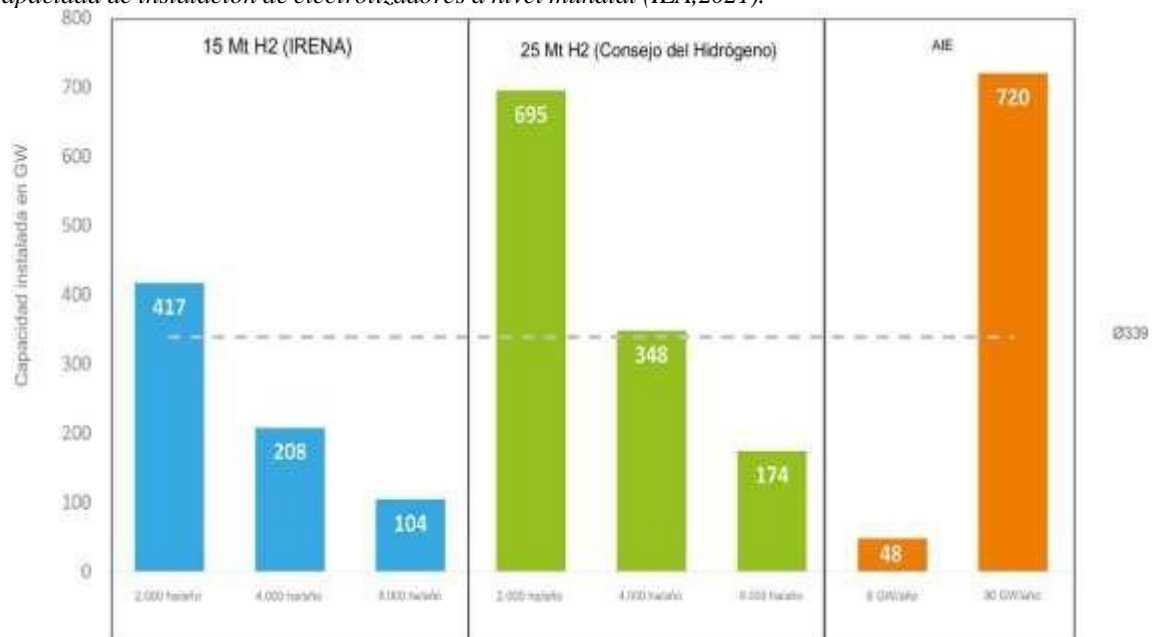
electrolizadores de agua. Estas tecnologías deben ser capaces de satisfacer la demanda de hidrógeno verde, que está creciendo sin control (IEA, Global Hydrogen Review 2021).

Según el modelo de cadena de suministro de IRENA, se proyecta que la demanda mundial de hidrógeno verde alcance alrededor de 15 Mt para 2030. En contraste, un estudio realizado por el Hydrogen Council y McKinsey & Company estima un suministro de entre 20 y 30 Mt, considerando 600 horas de funcionamiento y una capacidad instalada requerida de 200 a 250 GW (IRENA, 2021).

Al comparar diversas previsiones de demanda mundial, se puede calcular la capacidad instalada necesaria para distintos escenarios de horas de operación. Utilizando un pronóstico promedio de entre 15 Mt y 25 Mt de hidrógeno verde, se estima que será necesaria una capacidad de electrólisis de entre 104 y 695 GW para el año 2030 (Consejo del Hidrógeno, McKinsey & Company, 2021).

Figura 9:

Capacidad de instalación de electrolizadores a nivel mundial (IEA, 2021).



Nota: La figura muestra la comparación de las capacidades de electrolizadores instaladas necesarias para satisfacer la demanda de hidrógeno verde en 2030.

Tabla 4:

Capacidades de electrólisis instaladas para producir hidrógeno verde estado actual y perspectivas en Latinoamérica.

ESTADO ACTUAL (2020-2023)	PRONÓSTICO (2030 - 2050)
---------------------------	--------------------------

País	Toneladas por año Tn/a	Capacidad instalada operativa en GW/h para alcanzar la producción de H2	País	Toneladas por año Tn/a	Capacidad instalada operativa en GW/h para alcanzar la producción de H2
Argentina	11.635 Tn/a	2,0000 GW	Argentina	150.000 Tn/a	5 GW
México	10.000 Tn/a	1,3677 GW	México	430.000 Tn/a	6 GW
Brasil	10.000 Tn/a	0,0796 GW	Brasil	500.000 Tn/a	3 a 5 GW
Chile	13.600 Tn/a	1,8000 GW	Chile	155.000 Tn/a	25 GW
Colombia	15.000 Tn/a	0,0960 GW	Colombia	500.000 Tn/a	1 a 3 GW

Nota: *Elaboración propia, la tabla muestra el estado actual de cada país con respecto a las toneladas de capacidad de producción y la capacidad alcanzada de 2020-2030.*

En América Latina, para satisfacer la demanda proyectada de hidrógeno verde en la región para el año 2030, se estima que será necesario instalar una capacidad de electrólisis que oscile entre 104 y 695 GW (IEA, 2021). Esta norma de eficiencia energética ha motivado estrategias para el uso de hidrógeno verde en el alto potencial de los recursos eólicos y solares y de hidrógeno azul en polos de refinación industrial ya establecidos. Colombia planea tener entre 1 y 3 GW de capacidad de electrólisis para 2030, para producir hidrógeno renovable, con una producción anual de 500.000 toneladas (Ministerio de Minas y Energía de Colombia, 2020).

En Argentina, la capacidad de generación de energía renovable supera actualmente los 5 GW, representando aproximadamente el 15% de la demanda energética promedio del país. En febrero de 2023, Argentina alcanzó un récord del 29.7% en la participación de fuentes renovables en su matriz energética (IRENA, 2021). Las estimaciones del potencial de recursos renovables en Argentina indican que hay un potencial general de aproximadamente 29,000 TWh/año en energía solar fotovoltaica, eólica, hidroeléctrica y geotérmica, con la energía solar fotovoltaica representando el 57% de este potencial y la energía eólica el 42%. En los últimos años, Argentina ha experimentado un crecimiento significativo en la generación de energía renovable, cubriendo aproximadamente el 13% de la demanda total de electricidad con fuentes renovables en 2021 y sumando 47.57 MW de potencia instalada en nuevos proyectos (IRENA, 2021).

Chile también cuenta con un considerable potencial en energías renovables no convencionales, con aproximadamente 1,800 GW disponibles para el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde (IRENA, 2021).

Brasil cuenta con una capacidad instalada de producción de hidrógeno de 10 toneladas, y prevé una proyección de 500.000 toneladas al año para 2030, basándose en su potencial en fuentes de energía renovables como la solar y la eólica. El país busca una capacidad de generación de hidrógeno verde de entre 3 y 5 GW al año (IRENA, 2021).

Además, México cuenta con fuentes de energía renovable y una base industrial para producir y exportar hidrógeno verde. Actualmente, México cuenta con una capacidad de generación de 5 GW y en los próximos años buscará aumentar esa capacidad (GIZ, 2021).

4.4. Inversiones en hidrógeno y costos en celdas de combustible para la producción de hidrógeno verde

Según la empresa de energías renovables Hychico, con sede en Argentina, con una inversión total de 12 mil millones de dólares se podrían desarrollar parques eólicos, plantas de producción de hidrógeno y plantas de licuefacción para producir 430 mil toneladas de hidrógeno anualmente. Según la empresa, ese es el nivel de demanda que alcanzarán los países más desarrollados en los próximos 10 años. Cerca de 5 dólares por kilogramo es el precio estimado del hidrógeno, con el que Argentina ganaría entre 10 y 15 mil millones. La estrategia de desarrollo del hidrógeno verde incluye inversiones con reservas de gas para promover economías de escala, así como aquellas prácticas globales en Vaca Muerta, donde las energías renovables tienen un menor costo. También se incluyen en esta estrategia recursos de instituciones financieras internacionales y del fondo soberano de riqueza de Noruega. El país prevé que en 10 años la demanda alcance a los países más desarrollados al año, alcanzando una capacidad instalada de 430.000 toneladas en parques eólicos y equipos asociados de producción de hidrógeno verde. Esto permitiría que el país pasara del hidrógeno negro al hidrógeno gris y finalmente al azul, siempre y cuando se destinen recursos para implementar sistemas de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CAC). Según la Agencia Internacional de Energía (IEA), en 2019, el costo de producir hidrógeno azul en Argentina, a partir de gas natural y CAC, podría ser de alrededor de 1,9 dólares por kilogramo, un valor comparable al del hidrógeno verde (Schneider, 2021).

México: La startup israelí GenCell Energy, especializada en soluciones para la producción de energía fuera de la red y en redes deficientes mediante celdas de combustible de hidrógeno, fue seleccionada en diciembre de 2020 para implementar soluciones de respaldo para la Comisión Federal de Electricidad (CFE) de México. El valor del acuerdo se estima en 6 millones de dólares. Esto incluye el suministro y servicio de 37 celdas de combustible de hidrógeno en subestaciones en todo el país durante un período de dos años. También incluye una opción según la cual CFE podría comprar 37 unidades adicionales, lo que permitiría duplicar potencialmente el valor del contrato a 12 millones de dólares. La implementación se fijó para el primer semestre de 2021.

Colombia: Tras iniciarse el primer proyecto piloto de producción de hidrógeno verde en Colombia, H2B2 ha sido elegida para desarrollar las dos primeras estaciones de servicio de hidrógeno renovable en el país, con una inversión de 3,5 millones de dólares. Este proyecto es el segundo más grande de la compañía y fortalece su presencia en los mercados emergentes en alianza con el Grupo Ecopetrol. Colombia cuenta con más de 50 GW de potencial de energía renovable, lo que le otorga una gran capacidad de producción de hidrógeno para consumo local y exportación. Se estima que el país puede producir hasta 5.500 toneladas diarias de hidrógeno verde, lo que le reportaría unos ingresos anuales de más

de 8.000 millones de dólares si se calcula a 4 dólares el kilogramo. En 2021 Colombia tiene previsto presentar una hoja de ruta elaborada por el Ministerio de Minas y Energía y el BID, que fijaría los lineamientos para la producción y uso de hidrógeno verde, abarcando aspectos institucionales, legales, comerciales y financieros (OLADE, 2020).

En la región de Magallanes, en la Patagonia chilena, que alcanza una potencia equivalente al 50% de la eólica, el interés chileno se ha centrado en realizar grandes inversiones. En la actualidad, la electricidad en la región cuesta entre 25 y 30 dólares por MWh, pero se prevé que este precio caiga a 10-20 dólares por MWh a mediados de siglo. Esto haría que la producción de hidrógeno verde tuviera un precio equivalente al azul en torno a los 2,5 dólares por kilo. Chile aspira a producir 25 GW de electrólisis para 2030 y a unos costes de producción inferiores a 1,5 dólares por kilo para 2050, lo que estaría por debajo del promedio mundial. En la región de Magallanes se está preparando una planta piloto de hidrógeno verde que aprovechará la capacidad de generación de energía eólica de la región. Chile tiene un enorme potencial para la energía solar en el desierto de Atacama y también para la energía eólica en la zona sur del país y en la Patagonia. Todas estas capacidades incrementales seguramente necesitarán un lugar dentro de la matriz energética. La Agencia Internacional de Energía estima además que para 2030, el costo de producción de hidrógeno verde en Chile podría alcanzar como máximo 1,5 dólares por kilogramo. La Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde de Chile espera haber atraído inversiones por 5.000 millones de dólares para 2025 y alcanzar una meta de 25 GW de electrolizadores para 2030. Para ello, el país se compromete a abordar desafíos territoriales, sociales y ambientales (CORFO, 2022).

Tabla 5:

Prototipo de Inversión en electrolizadores en la producción de hidrógeno para Chile.

Descripción de la Inversión Técnica del Proyecto	
Potencia electrolizadora [MW]	0,43 MW
Producción de hidrógeno [ton/año]	96 kg/día
Producción de derivados (hidrógeno, amoníaco, metanol u otros) [ton/año] o [m3/año]	768 kg/día de O2
	Central hidráulica de
Suministro de energía eléctrica [MW solar/MW eólica/red/ppa]	2 MW
Suministro de agua y consumo requerido [l/año o m3/año]	13 L/kg H2
	136 ton CO2/año
Cantidad de Carbono equivalente no emitido [ton CO2/año]	CAPEX de USD
Monto de inversión [USD]	1.250.000

Año esperado de ingreso al SEIA

2023

Nota: *Elaboración propia, la tabla muestra el proyecto de “Cooperación técnica para proyectos de producción, almacenamiento, transporte y uso de hidrógeno verde”, fue financiado por el Fondo Bilateral para el Desarrollo en Transición Chile – Unión Europea.*

Esta iniciativa fue creada entre la Dirección General de Asociaciones Internacionales de la Comisión Europea y AGCID. Esta iniciativa cuenta con el apoyo del Ministerio de Energía de Chile y CORFO.

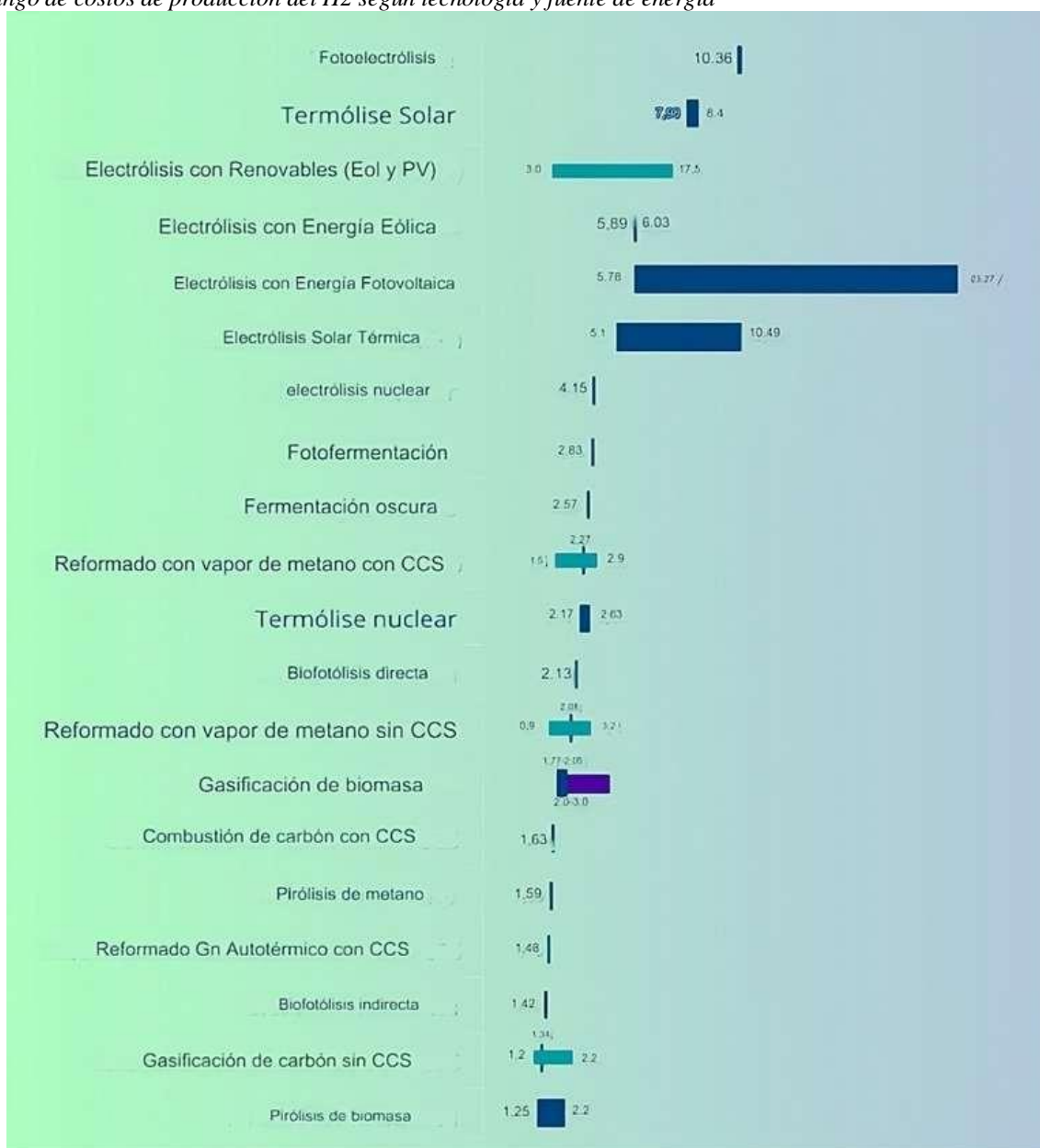
Hasta agosto de 2021, algunas empresas han anunciado proyectos de hidrógeno verde en Brasil, con una inversión estimada que suma unos 22.000 millones de dólares en total. La implementación de estos proyectos, sin embargo, depende de la capacidad del país para captar anualmente 10.000 millones de dólares a partir de 2021 de otros países. Solo en Brasil, la ventaja estratégica apunta al hecho de que están presentes el 80% de las empresas alemanas que integran la cadena de suministro de hidrógeno. También lo están el 95% de las empresas que integran el Consejo Global del Hidrógeno. Esto sugiere que Brasil tiene el potencial de alcanzar rápidamente un estado tecnológico avanzado en el ámbito del hidrógeno, beneficiándose de la experiencia y los conocimientos de las empresas ya establecidas.

Actualmente, la capacidad instalada de Brasil es de 170 TW, habiendo experimentado un crecimiento del 40% entre 2012 y 2019, con un pronóstico de crecimiento adicional del 13% en los próximos años. No obstante, se ha señalado que estas inversiones no serán suficientes para satisfacer la demanda necesaria para la recuperación de la economía nacional. Además, existe incertidumbre respecto a la viabilidad de los proyectos aún no concedidos, lo cual marca una diferencia significativa entre los escenarios optimistas y pesimistas en términos de inversión futura.

Según los estudios de planificación nacional elaborados en agosto de 2020, la transmisión de energía requiere una inversión total de R\$ 109 mil millones hasta 2030. Sin embargo, la falta de claridad sobre la implementación de proyectos no concesionados y las incertidumbres asociadas al contexto de la pandemia de COVID-19 podrían influir en una reducción de las inversiones a casi la mitad (EPE, 2021).

Figura 10:

Rango de costos de producción del H2 según tecnología y fuente de energía



Nota: Las bases para la consolidación de la Estrategia Brasileña de Hidrógeno según el Ministerio de Minas y Energía de Brasil, por su fuente de materia prima y en unidades monetarias en USD. Tomado de EPE (Empresa de Investigación Energética, 2021).

Tabla 6:

Rango de costos de producción del H2 según años de previsión, tecnología y fuente de energía

País	Costo actual de producción de H2 \$/kg 2019-2023	Precio previsto en dólares por kilogramo \$/kg		Tecnología	Fuente de energía
		2030	2050		
Argentina	1,9 \$/kg	1,8 \$/kg	1,2 \$/kg	Electrólisis con eólica	terrestre

Energía
Renovable/ Gas Natural

México	3 \$/kg	1,32 \$/kg	1,3 \$/kg	Electrólisis con solar FV	Gas Natural/ Energía Renovable
Brasil	4,5 \$/kg	2,7 \$/kg	1,7 \$/kg	Electrólisis con eólica terrestre	Energía Nuclear/ Energía Renovable
Chile	2,5 \$/kg	1,5 \$/kg	1,2 \$/kg	Electrolisis con Energía Eólica	Energía Eólica
Colombia	4,8 \$/kg	2,7 \$/kg	1,7 \$/kg	Electrolisis con Energía Eólica	Energía Renovable

Nota: elaboración propia, la tabla muestra las bases para la consolidación de la Estrategia Brasileña de Hidrógeno según el Ministerio de Minas y Energía de Brasil, por su fuente de materia prima y en unidades monetarias en USD. Tomado de EPE (Empresa de Investigación Energética, 2021). Fundación Konrad Adenauer (CEPAL, 2021).

Actualmente, el hidrógeno es crucial en términos económicos. El mercado global del hidrógeno se valoró en 2019 en entre 118 y 136 mil millones de dólares. Se prevé que este mercado aumente significativamente en los próximos años, alcanzando un valor de entre 160 y 200 mil millones de dólares. Este aumento proyectado se debe al reconocimiento creciente por parte de gobiernos y empresas del papel crucial que el hidrógeno desempeña en la reducción de las emisiones de carbono a nivel global y en el cumplimiento de los objetivos establecidos en el Acuerdo de París para 2050 (Schneider, 2021).

4.5. Análisis de proyectos de hidrógeno verde

En Argentina, fue la primera empresa en poner en marcha un proyecto piloto de hidrógeno renovable en América Latina en 2008. Los objetivos del proyecto son producir 52 toneladas/año de hidrógeno renovable (RH2) mediante dos electrolizadores alcalinos con una potencia total de 9,55 MW y además haber desarrollado electrolizadores a pequeña escala en Cerro Pabellón en Chile, en la planta piloto de Ad Astra Servicios Energéticos y Ambientales en Costa Rica, y también el primer electrolizador en Colombia, propiedad de Ecopetrol.

Chile es conocido por tener la mayor cantidad de proyectos de hidrógeno anunciados en la región. En octubre de 2021 se registraron más de 60 proyectos de Hidrógeno Renovable, en diferentes etapas de desarrollo, 50 anunciados públicamente por el Ministerio de Energía de Chile. Se espera que el 25% de ellos inicie operaciones antes de 2030. La mayoría de estos proyectos son de propiedad privada, aunque algunos reciben financiamiento del gobierno. También, a través de su fondo de inversión para América Latina, la Unión Europea ha invertido \$16,45 millones y ha brindado \$830,000 en asistencia técnica. CORFO también contribuirá con 250 millones de dólares. La instalación será gestionada por CORFO y está programada para comenzar a operar en el segundo semestre de 2024, con el objetivo de atraer una inversión total de 12,5 mil millones de dólares (Schneider, 2021).

Un total de 42 iniciativas de hidrógeno permiten a Brasil ocupar el segundo lugar en América Latina y el Caribe. Colombia posee 27 proyectos, lo que lo convierte en el tercer país con más iniciativas, seguido de Argentina con 11 y México con 9. Otros cinco proyectos piloto de hidrógeno están en marcha en Colombia con fuentes renovables. Esto sucede en el marco de uno de los proyectos en la refinería de Cartagena de Ecopetrol que tiene como objetivo la sustitución del hidrógeno gris por hidrógeno renovable. Se utiliza un electrolizador PEM de 50 kW, que se instala para producir 20 kilogramos de hidrógeno por día. Otro proyecto piloto, liderado por Promigas, utiliza un electrolizador PEM de 53,2 kW para inyección a la red de gas natural para producir 1,5 toneladas de hidrógeno renovable al año. Además, Ecopetrol trabaja en dos proyectos con Total Eren y EDF para construir dos unidades de 60 MW en refinerías de Colombia.

En general, la mayoría de los países de América Latina y el Caribe cuentan con fuentes de energía renovables de gran potencia, lo que hace que sea relativamente fácil emprender proyectos competitivos de hidrógeno renovable a gran escala. Como se indica en el informe "Proyectos de hidrógeno verde en América Latina y el Caribe", el éxito de los proyectos dependerá de la calidad y cantidad de los recursos renovables, en particular la energía eólica y solar, así como de la disponibilidad de tierras y el acceso a los cuerpos de agua. Sin embargo, México ha elaborado un plan de desarrollo del hidrógeno.

Aunque tiene muchos proyectos anunciados, no tiene una estrategia definida. Sin embargo, emitió un decreto que crea el Programa Nacional del Hidrógeno y su estructura de gestión, cambiando su estrategia conforme avanza en la producción. De los ocho países analizados en el estudio —Proyectos de hidrógeno verde en América Latina y el Caribe, cinco países cuentan con una estrategia de política pública en hidrógeno: Colombia, Brasil, México, Chile y Argentina (E&M, 2023)

Tabla 7:*Selección de principales proyectos de hidrógeno verde: Nombre, Capacidad renovable, Ubicación, Estado, Fuente, Total*

País	Nombre del proyecto	Capacidad Renovable (fuente de energía)	Capacidad de electrólisis (GW)/ disponible en el año	Ubicación	Información adicional	Estado	Fuente	Total, Proyectos
Argentina	Diadema Argentina	Energía Eólica	2.00 GW/a	Está ubicada aproximadamente a 20 kilómetros de la ciudad de Comodoro Rivadavia, en la provincia de Chubut- Argentina	Cuenta con dos electrolizadores con una capacidad total de 120 Nm ³ /h de hidrógeno	En funcionamiento: estudio de factibilidad finalizado	https://www.iea.org/reports/hydrogen-projects-database	11 proyectos
México	Proyecto Indicativo para la Instalación y Retiro de las Centrales Eléctricas (PIIRCE),	Energía fotovoltaicos, sistemas eólicos	13,677 GW/a	México	Para el corto y mediano plazo 2020-2024, solo los proyectos que tengan contratos de interconexión, y los que se	Varios subproyectos están en desarrollo.	https://www.kas.de/documents/273477/14464285/HIDR%2525C3%252593GENO+VERDE+EN+AM%2525C3%252589RIC	9 proyectos

					contemplan como estratégicos para lograr los objetivos de la política energética nacional.		A+LATINA.pdf/8bae839b-8621-adce-d02a-b583105a2057?version=1.0&t=1679411650518	
Brasil	(PROCaC) Proyecto de Ciencia, Tecnología e Innovación para la Economía del Hidrógeno	Energía hidroeléctrica, etanol, biomasa, sistemas fotovoltaicos, sistemas eólicos.	24,2 GW/a	Se encuentra ubicada en el complejo industrial de Camaçari, en el estado de Bahía	El documento también estableció un cronograma de 20 años para el logro de metas, relacionadas con cada tema propuesto.	Varios subproyectos están en desarrollo.	https://h2lac.org/paises/brasil/	42 proyectos
	Cerro Pabellón	Energía	340			En		5 proyectos
Chile	Microrred de Enel Green Power	Geotérmica	GW/a	En el Desierto de Atacama, al oeste de los Andes, Chile	Maneja un electrolizador PEM de 50 kW es decir utiliza tecnología de membrana de intercambio de protones	funcionamiento: estudio de factibilidad finalizado	https://emcombustion.es/proyectos-de-hidrogeno-verde-en-america-latina-y-el-caribe/	
Colombia	Fuentes no	Energía	50	Se encuentran		Fase	https://www.	27 proyectos

convencionales de energía (FNCE) y fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER)	fotovoltaicos, sistemas eólicos	GW/a	ubicadas principalmente en los departamentos de La Guajira, Cesar, y algunas zonas del centro del país.	Una serie de proyectos e iniciativas	conceptual	minenergia.gov.co/es/micrositios/enlace-ruta-hidrogeno/
---	---------------------------------	------	---	--------------------------------------	------------	---

Nota: elaboración propia, la tabla muestra Selección de principales proyectos de hidrógeno verde: Nombre, Capacidad renovable, Ubicación, Estado, Fuente, Total. Tomado de (Renewable Hydrogen in Latin América & The Caribbean Fundación, 2021).

4.6. Análisis de fabricación de electrolisis demandada en el mercado

En la segunda parte de la evaluación sobre el crecimiento del mercado de hidrógeno, se realizó un análisis detallado de los fabricantes de electrolizadores. Este análisis identificó 32 empresas que producen o planean construir sistemas de electrolisis de agua o componentes clave como las celdas. Es importante destacar que todas las empresas enumeradas ya están activas en el mercado y han anunciado públicamente su entrada en el sector de los electrolizadores.

La clasificación de los sistemas de electrolisis incluye una descripción general de la ubicación de las empresas y el tipo de tecnología de electrolisis de agua que producen. Los fabricantes se clasifican en las siguientes tecnologías:

1. Electrolisis de membrana de electrolito de polímero (PEM).
2. Electrolisis alcalina (AEL).
3. Celda de electrolisis de óxido sólido (SOEC).
4. Electrolisis de membrana de intercambio aniónico (AEM).

La electrolisis PEM es la electrolisis que mejor se puede integrar con fuentes de energía que se consideran renovables, como la eólica y la solar. Este tipo de electrolisis tiene otros dos nombres: electrolisis de agua con membrana de intercambio de protones o membrana electrolítica polimérica. Utiliza una membrana electrolítica polimérica con alta conductividad protónica, bajo cruce de gases, diseño de sistema compacto y operación a alta presión. Los sistemas PEM son capaces de operar a densidades de corriente muy altas, mayores de 2 A/cm². Esto significa que la corriente eléctrica que fluye a través de un centímetro cuadrado del sistema es mayor de 2 amperios. Por lo tanto, puede producir hidrógeno a alta presión, lo que es una gran ventaja para la eficiencia del sistema (Carmo et al., 2013).

La SOEC puede producir hidrógeno a una mayor velocidad de reacción química y con un menor consumo de energía eléctrica; por lo tanto, el funcionamiento a alta temperatura de las celdas electrolizadoras de óxido sólido (SOEC) es preferible a los electrolizadores PEM de baja temperatura e incluso más preferible a los electrolizadores alcalinos. La celda SOEC de alta temperatura parece una forma eficaz y económica de generar hidrógeno, lo que resulta extremadamente atractivo para la búsqueda de un nuevo enfoque tecnológico para impulsar el hidrógeno en los mercados energéticos (Ni et al., 2008).

La celda de electrolisis de óxido sólido (SOEC), la celda de membrana de intercambio de protones (PEM) y el electrolizador de agua alcalina (AEL) son los tres principales tipos estándar de electrolizadores de agua comerciales. Normalmente, los electrolizadores AEL y PEM funcionan a casi temperatura ambiente (generalmente entre temperatura ambiente y 90 °C), mientras que los SOEC funcionan a altas temperaturas, típicamente entre 700 y 950 °C.

Ya existen varias empresas que ofrecen electrolizadores de tipo alcalino (AEL) y PEM producidos en masa comercialmente. Esto expresa el crecimiento y la diversificación del mercado de electrolizadores (Grigoriev et al., 2020).

La mayoría de las compañías que fabrican electrolizadores en América Latina tienen su sede en Brasil, Chile, Colombia, Argentina y México. A partir de este análisis geográfico, se puede concluir que el enfoque de la industria de electrolizadores se encuentra en pleno despliegue, impulsado por el potencial significativo que la región presenta en términos de energías renovables.

En comparación con otros países, es evidente que habrá importantes ventas internacionales de electrolizadores, lo que plantea un desafío a la ventaja competitiva de América Latina. Este desafío radica en la distribución geográfica de las empresas en la región y su capacidad de producción y almacenamiento. Sin embargo, la evaluación del mercado indica un aumento significativo en la capacidad de adquisición de estos equipos. Los fabricantes han mostrado un progreso paulatino, triplicando su capacidad de producción de 6 GW a más de 20 GW por año en total. A medida que el mercado continúe desarrollándose, se espera que se construyan nuevas capacidades de fabricación y que más empresas anuncien su ingreso al mercado (Wappler et al., 2022).

Tabla 8:*Descripción general de las empresas fabricantes de electrolizadores de agua en América Latina 2019-2022.*

Nombre de Empresa	Pila	Sistema	Tecnología	Sede	Sitio web
FINEP – proyectos de investigación	X		AEL	Brasil	https://www.hytron.com.br/gas
FINEP – infraestructura PNUD EMTU Empresas Petrobras CNPq FAPESP ANEEL/CHESF	X		AEL PEM	Brasil	https://www.hytron.com.br/gas
PNUD EMTU Empresas EMTU		X	PEM	Brasil	https://www.hytron.com.br/gas
Empresas		X	SOEC	Brasil	https://www.hytron.com.br/gas
Empresas	X		PEM	Brasil	https://www.hytron.com.br/gas
Petrobras		X	AEL PEM	Brasil	https://www.hytron.com.br/gas
CNPq		X	PEM	Brasil	https://www.hytron.com.br/gas
FAPESP	X		AEL	Brasil	https://www.hytron.com.br/gas
ANNEEL/CHESF	X		AEL PEM	Brasil	https://www.hytron.com.br/gas
Profértil	X		AEL	Argentina	https://www.iea.org/countries/argentina
PASA S.A.	X		AEL	Argentina	https://www.iea.org/co

Fábrica militar		X	AEL	Argentina	https://www.iea.org/countries/argentina
YPF S.A.		X	SOEC	Argentina	https://www.iea.org/countries/argentina
YPF S.A.	X		AEL	Argentina	https://www.iea.org/countries/argentina
Resinfor Metanol S.A.	X		AEL	Argentina	https://www.iea.org/countries/argentina
YPF S.A.		X	SOEC	Argentina	https://www.iea.org/countries/argentina
Siderca		X	AEL	Argentina	https://www.iea.org/countries/argentina
Siderar		X	AEL PEM	Argentina	https://www.iea.org/countries/argentina
Air Liquide	X		AEL	Argentina	https://www.iea.org/countries/argentina
AGA	X		SOEC	Argentina	https://www.iea.org/countries/argentina
PEMEX		X	AEL	México	https://www.energypartnership.mx/fileadmin/user_upload/mexico/media_elements/reports/Hidro%CC%81geno_AE_Tomo_VI.pdf
CFE		X	AEL	México	https://www.energypartnership.mx/fileadmin/user_upload/mexico/media_elements/reports/Hidro%CC%81geno_AE_Tomo_VI.pdf

Enel Green Power Chile S.A	X	AEL	Chile	n/user_upload/mexico/media_elements/reports/Hidro%CC%81geno_AE_Tomo_VI.pdf https://www.gob.cl/noticias/chile-adjudica-usd50-millones-para-proyectos-de-hidrogeno-verde/
Empresa Nacional del Petróleos (ENAP)	X	AEL	Chile	https://www.gob.cl/noticias/chile-adjudica-usd50-millones-para-proyectos-de-hidrogeno-verde/
Engie S.A.	X	PEM	Chile	https://www.gob.cl/noticias/chile-adjudica-usd50-millones-para-proyectos-de-hidrogeno-verde/
Air Liquide S.A.	X	PEM	Chile	https://www.gob.cl/noticias/chile-adjudica-usd50-millones-para-proyectos-de-hidrogeno-verde/
GNL Quintero S.A.	X	AEL	Chile	https://www.gob.cl/noticias/chile-adjudica-usd50-millones-para-proyectos-de-hidrogeno-verde/

CAP S.A.		X	AEL SOEC	Chile	proyectos-de-hidrogeno-verde/ https://www.gob.cl/noticias/chile-adjudica-usd50-millones-para-proyectos-de-hidrogeno-verde/
Ecopetrol	X		PEM	Colombia	https://www.promigas.com/InformeSectorGas2022/Paginas/Hidrogeno.aspx#:~:text=Promigas%20y%20Ecopetrol%20fueron%20las,marzo%20de%202022%20en%20Cartagena.
Promigas	X		PEM	Colombia	https://www.promigas.com/InformeSectorGas2022/Paginas/Hidrogeno.aspx#:~:text=Promigas%20y%20Ecopetrol%20fueron%20las,marzo%20de%202022%20en%20Cartagena.
TGI	X		AEL	Colombia	https://www.promigas.com/InformeSectorGas2022/Paginas/Hidrogeno.aspx#:~:text=Pro

EPM	X	AEL	Colombia	migas% 20y% 20Ecope trol% 20fueron% 20las, marzo% 20de% 202022 % 20en% 20Cartagena. https://www.promigas.com/InformeSectorGas2022/Paginas/Hidrogeno.aspx#:~:text=Promigas% 20y% 20Ecope trol% 20fueron% 20las, marzo% 20de% 202022 % 20en% 20Cartagena.
-----	---	-----	----------	---

Nota: *Elaboración propia, la tabla muestra selección de principales proyectos de hidrógeno verde: Nombre, Capacidad renovable, Ubicación, Estado, Fuente, Total. Tomado de Agencia Internacional de energía de Hidrógeno (IEA, 2020).*

4.7. Previsión de capacidades de electrolisis instaladas hasta 2030

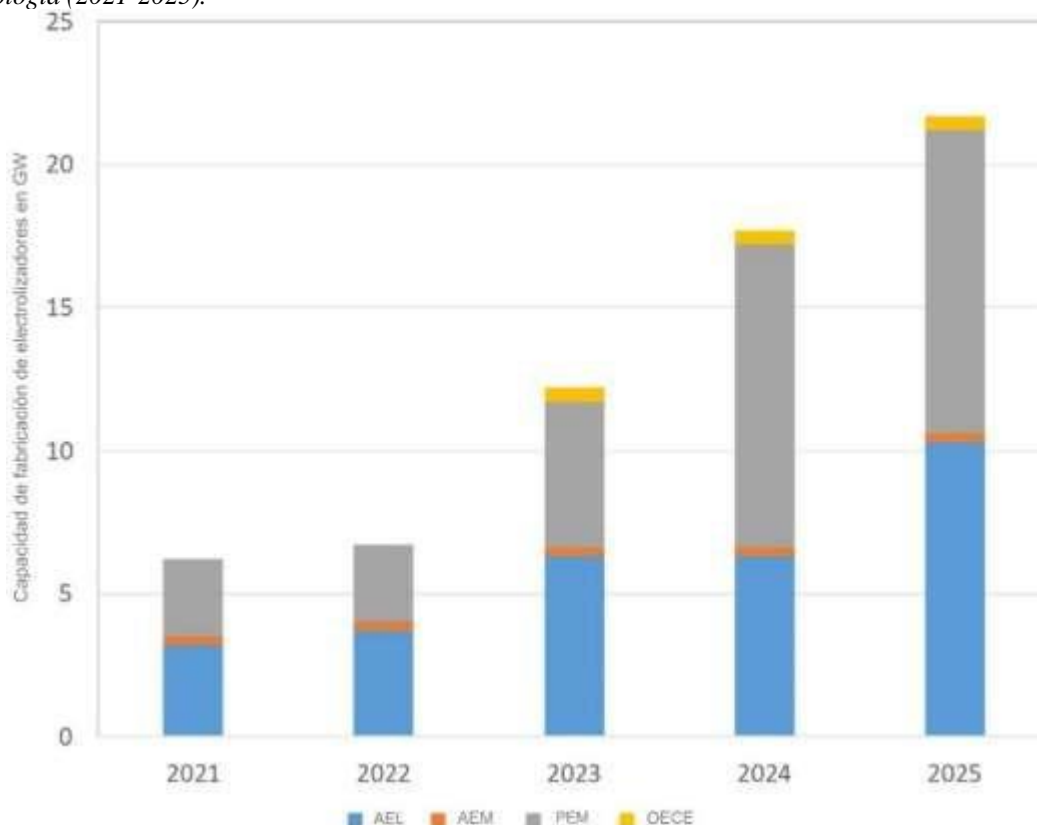
Las empresas han anunciado un aumento significativo en las capacidades de fabricación de electrolizadores para los próximos cuatro años. Este crecimiento proyectado en la capacidad instalada, medida en gigavatios (GW), se distribuye entre diferentes tecnologías de electrólisis a nivel mundial para el período 2021-2025. Las tecnologías consideradas en este pronóstico incluyen:

1. PEM (Electrólisis de membrana de electrolito de polímero).
2. AEL (Electrólisis alcalina).
3. SOEC (Celda de electrólisis de óxido sólido).
4. AEM (Electrólisis de membrana de intercambio aniónico).

El aumento en la capacidad instalada para cada una de estas tecnologías refleja la creciente demanda de hidrógeno verde y la aceleración de la transición energética global. Se espera que esta expansión en la capacidad de electrólisis impulse significativamente la producción de hidrógeno renovable, alineándose con los objetivos internacionales de descarbonización para 2030 (Wappler et al., 2022).

Figura 11:

Capacidades mundiales acumuladas de fabricación de electrolizadores en gigavatios ordenadas por tecnología (2021-2025).



Nota: [PEM - electrólisis de membrana de electrolito polimérico, AEL - electrólisis alcalina, SOEC - celda de electrólisis de óxido sólido y AEM - electrólisis de membrana de intercambio aniónico]. Tomado de artículo "Building the green hydrogen market – Current state and outlook on green hydrogen demand and electrolyzer manufacturing" la (p.14) por M. Wappler, 2022, Revista internacional de energía del hidrógeno.

Para analizar el desarrollo del mercado de electrolizadores, se definieron dos escenarios principales, junto con un tercer componente adicional que varía según el periodo de tiempo:

Escenario de Previsión 1: Este escenario asume que el 100% de las capacidades de fabricación serán utilizadas y desplegadas dos años después de su instalación. Se espera que, bajo este escenario, la capacidad de producción de electrolizadores se maximice rápidamente, lo que permitirá un despliegue ágil y eficiente de la infraestructura necesaria para la producción de hidrógeno verde.

Escenario de Previsión 2: En este escenario, se considera que solo el 50% de la capacidad de fabricación será utilizada entre 2022 y 2025, con un incremento al 80% entre 2026 y 2028. Las capacidades desplegadas en este escenario también se contemplarían después de dos años. Este enfoque más gradual refleja una expansión del mercado que avanza a un ritmo más conservador, permitiendo ajustes y optimizaciones antes de alcanzar el pleno rendimiento.

Estos escenarios ayudan a prever cómo podría desarrollarse el mercado bajo diferentes tasas de utilización de la capacidad de fabricación. Esto, a su vez, influye en la disponibilidad de electrolizadores y en la capacidad global para producir hidrógeno verde en los próximos años (Wappler et al., 2022).

Tabla 9:

Escenarios de previsión para Latinoamérica 2020 – 2030.

País	Producción 2020 Total en Tn/a	a) escenario de previsión 1 con el 100 % de las capacidades de fabricación utilizadas y desplegadas después de 2 años con una tasa de crecimiento del 10%	b) escenario de previsión 2 con el 50 % de capacidad de fabricación utilizada entre 2023 y 2025 con una tasa de crecimiento del 40%	c) el 80 % entre 2026 y 2028 desplegada después de dos años dependiendo en los tres escenarios de mercado con una tasa de crecimiento del 200%
		Argentina	11.6350	12.798,50
México	10.000	11.000,00	7.700,00	18.480,00
Brasil	10.000	11.000,00	7.700,00	18.480,00
Chile	13.600	14.960,00	10.472,00	25.132,80
Colombia	150.000	165.000,00	115.500,00	277.200,00

Nota: *Elaboración propia, Escenario de pronóstico 1: Se supone que en este escenario se utilizarán todas las capacidades de fabricación. Esto significa que de 2020 a 2022 se utilizarán todas las capacidades de fabricación anunciadas. Escenario de pronóstico 2: Este escenario supone una utilización del 50% de las capacidades de fabricación entre 2023 y 2025 y del 80% entre 2026 y 2028 para reflejar el desarrollo actual del mercado. Esta suposición se deriva de la sección de análisis del proyecto, que reveló la disponibilidad de la capacidad de electrolisis entre 3 y 5 años después de la FID.*

El desarrollo de un electrolizador a escala de gigavatios suele demorar dos años, por lo que el inicio de la producción real de hidrógeno se establece a dos años de su fabricación por parte de los proveedores. Este puede ser un proceso crítico para regiones que tienen un alto potencial de energía renovable, como es el caso de Chile, que ha revelado ser un mercado altamente competitivo en el sector energético. El informe Climatescope 2021 de Bloomberg posicionó a Chile como el segundo país más atractivo, de 107 economías emergentes, para la inversión en energías renovables y el 11° a nivel mundial. Esto se ha dado gracias a un sector eléctrico bien estructurado y a políticas energéticas consistentes que han situado al país, en los últimos años, como uno de los que mayores inversiones en energías limpias tienen.

En el ámbito del hidrógeno verde, varias empresas han anunciado proyectos e iniciativas en Chile, con más de 130 socios entre los que se encuentra la Asociación Chilena del Hidrógeno (H2Chile). Con el 70% de su capacidad instalada dedicada a la tecnología de electrolizadores, Chile refleja un ecosistema privado activo que busca desarrollar proyectos y expandir rápidamente este mercado. Siguiendo una trayectoria similar a la de Chile, México tiene el 68% de su capacidad instalada en tecnología de electrolizadores, lo que denota un gran compromiso con el desarrollo del hidrógeno verde.

Recursos Renovables y Descarbonización:

Chile cuenta con importantes recursos renovables: solar, eólica, geotérmica e hidroeléctrica. Si bien en 2019 gran parte de la energía fue importada por el país a partir de fuentes fósiles, se han fijado objetivos ambiciosos. El objetivo es aumentar el uso de fuentes de energía renovables y, al mismo tiempo, reducir la dependencia de los combustibles fósiles.

Argentina y otros países de América Latina también están progresando en su transición hacia energías renovables. Argentina cuenta con un potencial del 63% de capacidad en plantas de captación de energía renovable, y está invirtiendo en nuevas pilas y celdas de almacenamiento de energía comprimida para su transformación.

Colombia, por ejemplo, tiene una matriz energética limpia, con un 68% de su producción eléctrica proveniente de fuentes hidroeléctricas en 2019. Brasil ha logrado un 67% de energía producida mediante recursos renovables, lo que destaca su compromiso con la reducción de la cantidad de carbono en su sistema energético.

Si bien algunos países de la región enfrentan desafíos económicos o carecen de recursos naturales para la descarbonización, existen ayudas financieras y planes de transición energética que buscan incentivar la generación de fuentes de energía renovables. Esta capacidad instalada y los recursos renovables disponibles pretenden resolver la descarbonización de la matriz energética en varios países, aprovechando la inversión inicial en estas tecnologías.

Estrategias de Electromovilidad:

Argentina, Brasil, Bolivia, Chile, Colombia y México son algunos de los países que han llevado a cabo estrategias e iniciativas de electromovilidad en la región. La electrificación del transporte también está incluida en las metas de contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC) de casi todos los países, con algunos liderando en la región en este aspecto (Schneider, 2021).

Uno de los pilares de las estrategias de electrificación es fijar metas de venta de vehículos con cero emisiones, pero hasta ahora son muy pocos los países de la región que han fijado esas metas de manera concreta.

Chile tiene los planes de descarbonización más ambiciosos de la región, lo que lo hace destacar. El país ha establecido objetivos para que para 2045, el 100% de las nuevas ventas de automóviles, autobuses interurbanos y vehículos de transporte de carga sean cero emisiones. También tiene una meta intermedia para vehículos de carga para 2035.

Tabla 10:
Programas y políticas de países seleccionados en América Latina con relación a la descarbonización del transporte de carga.

País	Estándares de eficiencia energética	Estándares de emisiones	Impuestos al carbono	Programas voluntarios de carga verde	Metas de ventas 100% cero emisiones
Argentina			*	*	
Brasil	Pesados (2032)	Pesados 2023		*	
Chile	Medianos* Pesados (2028)	Mediano y Pesados (2024)	*	*	Livianos y mediano: 2035
Colombia		Mediano y Pesados (2023)	*	*	Pesados: 2050
México		Pesados (2025)	*	*	

Notas: *Elaboración propia, la tabla muestra los estándares de eficiencia energética con base en los países miembros, asimismo por sus estándares de emisiones lo cual cumple que los programas vinculas a sus ventas ejecuten el 100% del cumplimiento bajo emisiones. Señala (*) Definido para todos los sectores vehiculares, relevantes para cada columna. Tomado International de Council on Clean Transportation, 2023).*

Colombia ha implementado una ley que exige que el 100% de los nuevos autobuses urbanos incorporados a su flota sean de cero emisiones para el año 2035. Esta política es parte de un esfuerzo más amplio en la región para promover la movilidad sostenible. En paralelo, Chile se destaca como el único país de América Latina que ha firmado el Memorando de Entendimiento Global durante la COP26. Este acuerdo establece objetivos ambiciosos para la transición hacia vehículos de cero emisiones, exigiendo que el 30% de las ventas de nuevos camiones medianos y pesados sean de cero emisiones para 2030, con la meta de alcanzar el 100% para 2040 (Acevedo et al., 2023; International Council on Clean Transportation, 2023).

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

La demanda de hidrógeno verde en América Latina tiene una fuerte dependencia de la tecnología existente en la región y, además, de la capacidad de los países para producir energía renovable con el fin de reemplazar los combustibles fósiles. Estas limitaciones tecnológicas suponen una verdadera barrera para avanzar en la economía del hidrógeno, ya que la infraestructura energética en muchos países no es lo suficientemente adecuada en función de las previsiones de demanda actuales. De ahí la necesidad de acelerar las tecnologías y realizar importantes esfuerzos de infraestructura basados en la producción de energía renovable.

Además, llama la atención la diversidad de proyectos de producción de hidrógeno por electrólisis en la región. Esta variedad se debe a la tecnología, al tiempo de implementación y a las políticas gubernamentales vigentes. Por ello, la mayoría de estos proyectos tendrán éxito a mediano y largo plazo solo si se elaboran estrategias y hojas de ruta nacionales sobre el desarrollo del hidrógeno verde en cada país. Estas deben ser planificadas y adecuadas a las realidades locales para obtener resultados efectivos.

En conclusión, la capacidad instalada de electrolizadores en América Latina debe crecer de 78 a 720 GW. Según la Agencia Internacional de Energía, esto implicará que la fabricación de electrolizadores crecerá más de 200% entre 2025 y 2030. Este desafío no solo es crucial para la región sino también para su posicionamiento como líder global en la producción de hidrógeno verde, lo que contribuye decisivamente a la descarbonización de la economía mundial.

5.2. Recomendaciones

En vista de lo anterior, dada la urgencia de diversificar la matriz energética en América Latina y el papel potencial del hidrógeno verde, se recomienda encarecidamente que Ecuador elabore una estrategia nacional para integrar esta tecnología en la matriz energética del país. Dicha estrategia estaría sujeta a la condición de que se evalúe el potencial de recursos renovables que posee el país, se cuente con la infraestructura necesaria y se formulen políticas e incentivos que atraigan la inversión en I+D de tecnologías de hidrógeno. El hidrógeno verde puede integrarse aún más en el transporte y la industria para asegurar que Ecuador ocupe un papel de liderazgo en la sostenibilidad energética a nivel regional, asumiendo seriamente esos compromisos y proporcionando nuevos vectores de desarrollo económico sostenible.

Además, si queremos impulsar la producción de electrolizadores en la región, es muy importante que los costos relacionados con los sistemas de plantas de energía renovable que se desarrollen y operen tengan un valor óptimo. Esto requiere una consideración estratégica sobre cómo se asignan los recursos financieros; deben inclinarse

hacia vías que tengan una alta viabilidad y las instituciones responsables deben tener el tipo adecuado de acreditación y apoyo para brindar asistencia técnica y operativa de calidad. Este tipo de enfoque de asignación de recursos, al ser más eficiente, brinda espacio para que se desarrollen proyectos de hidrógeno verde, mejorando así la competitividad de la región en este nuevo mercado.

Finalmente, para asegurar un adecuado seguimiento de los avances en materia de energías renovables que se están implementando, se deben aplicar otras metodologías como los cálculos de metarregresión. De esta manera, los procesos de verificación y evaluación contarían con información de mayor calidad, más precisa y confiable para la toma de decisiones a nivel estratégico. Esta metodología será el lugar donde se puedan optimizar las políticas públicas y ajustar las estrategias en tiempo real para que las metas en materia de descarbonización y transición energética se cumplan de manera efectiva.

CAPÍTULO VI.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abe, J., Popoola, A., Ajenifuja, E., & Popoola, O. (2019). Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(29), 15072-15086. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.068>
- Acevedo, H., Pettigrew, S., Pineda, L., & Delgado, O. (2023). Hoja de ruta para descarbonizar el transporte de carga en América Latina entre 2025 Y 2050. *International Council On Clean Transportation*, Vol.2. <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/08/Hoja-de-Ruta-Consultant-Report-A4-v3.pdf>
- AIE, París (2021) <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>
- Arispe, C., Yangali, J., Guerrero, M., Lozada, O., Acuña, L., & Arrellano, C. (2020). *La investigación científica*. https://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/4310/1/LA_INVESTIGACIÓN_CIENTÍFICA.pdf
- Bachelet, M. B., Flies, J., Horst, B., de Solminihac, H., Dorador, C., & Jobet, J. C. (2022). Medidas de impulso al Plan de Acción de Hidrógeno Verde 2023-2030. Plan de acción Hidrógeno Verde Gobierno de Chile, N° 4. <https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/documento-medidas-de-impulso-h2v.pdf>.
- Baseline to support the Brazilian Hydrogen Strategy'. Gobierno de Brasil, Ministerio de Minas y Energía (2021): [https://48424 >EiJ. B. SÁNCHEZ-PEÑUELA LEJARRAGA www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT_Hidroge%CC%82nio_EN_revMAE%20\(1\).pdf](https://48424>EiJ.B.SÁNCHEZ-PEÑUELALEJARRAGAwww.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT_Hidroge%CC%82nio_EN_revMAE%20(1).pdf).
- Bautista, J., & Peñuela. (2020). ESTRATEGIAS NACIONALES SOBRE HIDRÓGENO: UNA VISIÓN COMPARADA. <https://www.mintur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/424/SA%CC%81NCHEZ-PEN%CC%83UELA%20LEJARRAGA.pdf>.
- Beliz, G., & Papa, J. (2021). Hacia una Estrategia Nacional Hidrógeno 2030 Argentina. Consejo Económico y Social Argentina Presidencia, vol 2, 12-20. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/segundo_documento_ces_hidrogeno.pdf
- Bermúdez, J., Widell, A., & Pal, S. (2019). Iniciativa Hidrógeno CEM. Agencia Internacional de Energía, N°14. <https://www.iea.org/programmes/cem-hydrogen-initiative>.

- Berry, GD y Aceves, SM (2006). La economía del hidrógeno como solución al problema de la medición del clima mundial. *Acta Universitaria*, 16 (1), 5-14.
- Botella, J., & Zamora, Á. (2017). El meta-análISIS: Una metodología para la investigación en educación. *Educacion XXI*, 20(2), 17–38. <https://doi.org/10.5944/educXX1.18241>
- Cardella, U., Decker, L., & Klein, H. (2017). Roadmap to economically viable hydrogen liquefaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(19), 13329-13338. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.068>
- Carmo, M., Fritz, D., Mergel, J., & Stolten, D. (2013). A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 38(12), 4901-4934. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.151>
- Chávez- Ángel, E., Castro-Alvarez, A., Sapunar, N., Henríquez, F., Saavedra, J., Rodríguez, S., Cornejo, I., & Maxwell, L. (2023). Exploring the Potential of Green Hydrogen Production and Application in the Antofagasta Region of Chile. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en16114509>.
- Chheda, J.N., G. W. Huber, J.A. Dumesic, *Angewandte Chemie*, 46(38) (2007) 7164-7183. Producción de hidrógeno por vía electroquímica vs vía térmica. (s. f.). CIC energigUNE. <https://cicenergigune.com/es/blog/produccion-hidrogeno-via-electroquimica-via-termica>
- Chopra S. Gestión de la cadena de suministro: estrategia, planificación y operación.
- Cano-Sáenz, C. G. (2008). *La economía del cambio climático y la opción amazónica*. <https://doi.org/10.32468/be.530>
- Colombia – H2LAC. (2023, 8 noviembre). H2LAC. <https://h2lac.org/paises/colombia/>
- Consejo del Hidrógeno, McKinsey & Company Hidrógeno para cero emisiones netas: un vector energético crítico y competitivo en costos <https://hidrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/11/Hydrogen-for-Net-Zero.pdf> (2021), consultado el 30 de abril de 2022.
- Correa A., M., Maluenda P., B., & Barría Q., C. (2020). Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde Chile. Ministerio de Energía, Gobierno de Chile, N° 2. https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf.
- Decarbonising end-use sectors: Practical insights on green hydrogen. (2021, 1 mayo). <https://www.irena.org/publications/2021/May/Decarbonising-end-use-sectors-greenhydrogen>.

- Defense Acquisition University. (2008). Hoja de ruta del producto. DAU. <https://aaf.dau.edu/aaf/software/product-roadmap/>.
- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. (2021). Hidrógeno verde en México: el potencial de la transformación. Alianza Energética entre México y Alemania (AE), Tomo VI: Análisis de la cadena de valor local y del potencial de exportación de hidrógeno verde (No. 4), 01-09. https://www.energypartnership.mx/fileadmin/user_upload/mexico/media_elements/reports/Hidro%CC%81geno_AE_Tomo_VI.pdf.
- E&A; MC. (2023, 22 noviembre). Proyectos de Hidrógeno Verde en América Latina y el Caribe. Quemadores Industriales-gas-gasoil-biomasa-calderas. <https://emcombustion.es/proyectos-de-hidrogeno-verde-en-america-latina-y-el-caribe/>
- Edición mundial. Pearson; 2019. <https://www.pearson-studium.de/isbn/9781292257914>.
- EPE, 2020. Resenha Mensal Mercado de Energia Elétrica, base dezembro 2020. Disponible en. <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-153/topico-574/Resenha%20Janeiro%202021%20%20Es%20curo%20Final.pdf>.
- Esily, R. R., Chi, Y., Ibrahiem, D. M., & Chen, Y. (2022). Hydrogen strategy in decarbonization era: Egypt as a case study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(43), 18629-18647. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.04.012>
- Fondo Bilateral para el Desarrollo en Transición Chile – Unión Europea. (2022). Cooperación Técnica para proyectos de producción, almacenamiento, transporte y uso de hidrógeno verde. Ministerio de Energía de Chile y la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO), N°1. https://www.eeas.europa.eu/sites/default/files/documents/H2_VERDE_BROCHURE_2022.pdf
- Genovese, M., Schlüter, A., Scionti, E., Piraino, F., Corigliano, O., & Fragiaco, P. (2023). Power-to-hydrogen and hydrogen-to-X energy systems for the industry of the future in Europe. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(44), 16545- 16568. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.194>
- Gischler, C., Daza, E., Galeano, P., Ramírez, M., Gonzalez, J., Cubillos, F., Hartmann, N., Pradelli, V., Marquez, J., Gutiérrez, J., Hermosillo, J., Rodriguez, C., Souilla, L., & Rabinovich, J. (2023). Unlocking Green and Just Hydrogen in Latin America and the Caribbean. . <https://doi.org/10.18235/0004948>.
- GIZ Coperación Alemana Deutsche Zusammenarbeit. (2021). Hidrógeno verde en México: el potencial de la transformación. Alianza energética Energiepartnerschaft,

https://www.energypartnership.mx/fileadmin/user_upload/mexico/media_elements/reports/Hidro%CC%81geno_AE_Tomo_VI.pdf.

Global Hydrogen Review 2021 – Analysis - IEA. (s. f.). IEA. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>

Grigoriev, S., Фатеев, B. H., Bessarabov, D., & Millet, P. (2020). Current status, research trends, and challenges in water electrolysis science and technology. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 45(49), 26036-26058. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.109>

Harris, W. N. (2003). *The Hydrogen Economy: The Creation of the Worldwide Energy Web and the Redistribution of Power on Earth*, By Jeremy Rifkin. Tarcher/Putnam, 2002, 285 pp., US \$24.95. ISBN 1-58542-193-6 (paperback). *Ecological Engineering*, 20(3), 265-266. [https://doi.org/10.1016/s0925-8574\(02\)00140-4](https://doi.org/10.1016/s0925-8574(02)00140-4).

Higgins, J., & Green, S. (2011). Manual Cochrane de revisiones sistemáticas de intervenciones. *Cochrane Database of Systematic Reviews*. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD011779.pub3>

Hydrogen Council, McKinsey & Company. *Hydrogen for net zero: a critical cost-competitive energy Vector*. <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/11/Hydrogenfor-Net-Zero.pdf>. [Accessed 30 April 2022]

IEA, CEM Hydrogen Initiative–Programmes - IEA. (s. f.). IEA. <https://www.iea.org/programmes/cem-hydrogen-initiative>

IEA, Hydrogen - Fuels & Technologies - IEA. (s. f.-b). IEA. <https://www.iea.org/fuels-andtechnologies/hydrogen>.

IEA, 10th Clean Energy Ministerial (CEM10) | Clean Energy Ministerial. (s. f.). Clean Energy Ministerial. <https://www.cleanenergyministerial.org/ministerials/cem10-vancouvercanada/>.

International Journal of Hydrogen Energy, 47(58), 24592-24609. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.077>

International Journal of Hydrogen Energy, 48(52), 19751-19771. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.02.078>

IRENA, *Transformación energética global: una hoja de ruta hacia 2050* (edición 2019) , Agencia Internacional de Energías Renovables , Abu Dhabi (2019) <https://www.irena.org/publications/2019/Apr/Global-energy-transformation-A-roadmap-to-2050-2019Edition>.

- Journal of Hydrogen Energy, 47(2), 728-734. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.084>
- Journal of Hydrogen Energy, 47(20), 10803-10824. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.137>
- Kar, S. K., Harichandan, S., & Roy, B. (2022). Bibliometric analysis of the research on hydrogen economy: An analysis of current findings and roadmap ahead International.
- Kirmayr, M., Quilodrán, C., Valente, B., Loezar, C., Garegnani, L., & Franco, J. V. A. (2021). Metodología GRADE, parte 1: cómo evaluar la certeza de la evidencia. *Medwave*, 21(2), 1–10. <https://doi.org/10.5867/medwave.2021.02.8109>
- Livera, J. o. S., & Gatto, M. F. (2024). Desenvolvimento industrial em Alfred Marshall. *Cuadernos de Educación y Desarrollo*, 16(7), e4809. <https://doi.org/10.55905/cuadv16n7-070>
- Li, Y., Shi, X., & Phoumin, H. (2022). A strategic roadmap for large-scale green hydrogen demonstration and commercialisation in China: A review and survey analysis.
- CIC EnergiGUNE, (2022). Métodos de producción de hidrógeno y sus colores. (s. f.) <https://cicenergigune.com/es/blog/metodos-produccion-hidrogeno-colores>
- Macedo, S., Peyerl, D., & Filho, D. (2023). Brazilian hydrogen economy development. *Revista Brasileira de Energia*. <https://doi.org/10.47168/rbe.v29i2.800>.
- Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2020). Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia. *Mi Energía*, N° 2, 15-20. https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia_2810.pdf
- Muñoz, J., Beleño, W., & Díaz, H. (2022). Análisis del potencial del uso de hidrógeno verde para reducción de emisiones de carbono en Colombia. *Revista Fuentes: el Reventón. Energético*, 20(1), 57–72. <https://doi.org/10.18273/revfue.v20n1-2022006>
- Naranjo, S. C. (2019, 4 diciembre). La contaminación del aire en América Latina. *Statista Daily Data*. <https://es.statista.com/grafico/20195/emisiones-de-co2-en-paises-latinoamericanos-seleccionados/>
- Ni, M., Leung, M. K., & Leung, D. Y. (2008). Technological development of hydrogen production by solid oxide electrolyzer cell (SOEC). *International Journal Of Hydrogen Energy*, 33(9), 2337-2354. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.02.048>

- Noussan, M., Raimondi, P., Scita, R., & Hafner, M. (2020). The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition—A Technological and Geopolitical Perspective. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su13010298>.
- Nullis, C. (2018). El IPCC publica el Informe especial sobre el calentamiento global de 1,5 °C. *Boletín - Organización Meteorológica Mundial*, 67(2), 4-7. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6884122>
- Oecd, Commission, E., America, C. D. B. O. L., & Caribbean, E. C. F. L. A. A. T. (2022). *Perspectivas económicas de América Latina 2022 Hacia una transición verde y justa: Hacia una transición verde y justa*. OECD Publishing.
- OLADE, Organización Latinoamericana de Energía, 2020. Precios de la Energía de América Latina y el Caribe. Informe Anual 2019. En <http://www.olade.org/publicaciones/precios-de-la-energ%ef%bf%bda-en-america-latina-y-el-caribe-informe-anual-marzo-2020/>.
- Pan, L., Xu, X., Liu, J., & Hu, W. (2023). Adaptive robust scheduling of a hydro/photovoltaic/pumped-storage hybrid system in day-ahead electricity and hydrogen markets. *Sustainable Cities and Society*, 95, 104571. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104571>
- Paris Agreement. <https://unfccc.int/process/conferences/pastconferences/paris-climatechange-conferencenovember-2015/paris-agreement>. [Accessed 7 January 2022].
- Pingkuo, L., & Xue, H. (2022). Comparative analysis on similarities and differences of hydrogen energy development in the World's top 4 largest economies: A novel framework. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(16), 9485-9503. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.038>
- Planeamiento energético. (2023, 17 mayo). Argentina.gob.ar. <https://www.argentina.gob.ar/economía/energía/planeamiento-energético>.
- Portal do Hidrogênio Verde. (2023b, octubre 13). Rede Setorial GADER-ALC da GIZ promove evento regional «Hidrogênio Verde – Fazendo a ponte entre o setor acadêmico e o setor privado na América Latina» | Portal Hidrogênio Verde. Portal Hidrogênio Verde. <https://www.h2verdebrasil.com.br/noticia/rede-setorial-gader-alc-da-giz-promove-evento-regional-hidrogenio-verde-fazendo-a-ponte-entre-o-setor-academico-e-o-setor-privado-na-america-latina/>.
- Reksten, A. H., Thomassen, M. S., Møller-Holst, S., & Sundseth, K. (2022). Projecting the future cost of PEM and alkaline water electrolyzers; a CAPEX model including electrolyser plant size and technology development. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(90), 38106-38113. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.306>.

- Roca Jusmet, J. (2023). Herman Daly (1938-2022): un referente de la economía ecológica. *Revista De Economía Crítica*, (36), 199–210. Recuperado a partir de <https://www.revistaeconomicacritica.org/index.php/rec/article/view/744>.
- Sadik-Zada, E. (2021). Political Economy of Green Hydrogen Rollout: A Global Perspective. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su132313464>.
- Sarkar, M., & Seo, Y. W. (2021). Renewable energy supply chain management with flexibility and automation in a production system. *Journal of Cleaner Production*, 324, 129149. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129149>
- Schneider, H. (2021). Hidrógeno verde en América Latina: posibilidades, barreras y oportunidades. *KONRAD EDENAUER STIFTUNG*, 2(Nº 2), 119-148. <https://www.kas.de/documents/273477/14464285/HIDR%2525C3%252593GENO+VERDE+EN+AM%2525C3%252589RICA+LATINA.pdf/8bae839b-8621-adced02a-b583105a2057?version=1.0&t=1679411650518>.
- Secretaría de Asuntos Estratégicos. (2023, 10 diciembre). Argentina.gob.ar. <https://www.argentina.gob.ar/asuntos-estrategicos>.
- ShieldSquare Block. (s. f.). <https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/documento-medidas-de-impulso-h2v.pdf>.
- Valle, A., Manrique, L., & Revilla, D. (2022). La Investigación Descriptiva con Enfoque Cualitativo en Educación. In *Pontificia Universidad Católica del Perú*. [https://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/4310/1/LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA.pdf](https://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/4310/1/LA_INVESTIGACIÓN_CIENTÍFICA.pdf)
- Virent Energy Systems, [[http:// green energy reporter .com/ renewables/ biofuel/ virent-energysystems](http://greenenergyreporter.com/renewables/biofuel/virent-energysystems)].
- Viteri, J. P., Viteri, S., Alvarez-Vasco, C., & Henao, F. (2023). A systematic review on green hydrogen for off-grid communities –technologies, advantages, and limitations.
- Wappler, M., Unguder, D., Lu, X., Ohlmeyer, H., Teschke, H., & Lueke, W. (2022). Building the green hydrogen market – Current state and outlook on green hydrogen demand and electrolyzer manufacturing. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 47(79), 33551-33570. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.253>
- Wellenstein, A. (Director). (2021). Hoja de ruta para la acción climática en América Latina y el Caribe: 2021-2025. En F. Jaramillo (Ed.), BID. Oficina Regional de América Latina y el Caribe del Banco Mundial. Recuperado 9 de enero de 2022, de <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099720409072236507/pdf/P1757390190fc60ff09f7a0cd027f00166a.pdf>

World Health Organization: WHO. (2018, 2 mayo). Nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado. (OMS). <https://www.who.int/es/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>

World Health Organization: WHO. (2022, 19 diciembre). Contaminación del aire ambiente (exterior). [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

Zhang, R., Yu, L., Daiyan, R., & Amal, R. (2022). A green hydrogen credit framework for international green hydrogen trading towards a carbon neutral future. International

**CAPÍTULO VII.
ANEXOS**

Net Zero	Cero Neto (Contaminación)
Metaestudio	Método sistemático para sintetizar resultados de diferentes estudios empíricos sobre el efecto de una variable independiente
OMS	Organización Mundial de la Salud
CYTEC	Programa de cooperación multilateral en ciencia y tecnología
CIC energiGUNE	Consorcio Científico y Tecnológico Vasco-Alianza Vasca para la Investigación y la Tecnología
IEA	Agencia Internacional de Energía
CEM H2I	Clean Energy Ministerial (Ministerial de Energía Limpia)
IRENE	Agencia Internacional de Energías Renovables
BEV	Vehículo eléctrico de batería
CAPEX	Gasto de capital
CNPE	Consejo Nacional de Política Energética (Brasil)
CORFO	Corporación de Fomento de la Producción (agencia de desarrollo económico de Chile)
EPE	Oficina de Investigación Energética (Brasil)
ASG	Ambiental, social y gobierno corporativo
RCDE	Régimen de comercio de derechos de emisión
FCEV	Vehículo eléctrico de celda de combustible
IPHE	Asociación Internacional para la Economía del Hidrógeno y las Celdas de Combustible
ISO	Organización Internacional de Normalización
LCV	Vehículo comercial ligero
LDV	Vehículo ligero
LPV	Turismo ligero
OPEX	Gasto operativo
RELAC	Energía Renovable en América Latina y el Caribe
I+D	Investigación y desarrollo
SICA	Sistema de Integración Centroamericana
FID	"Final Investment Decision" (Decisión Final de Inversión), que es un término utilizado en el ámbito de la inversión para denotar la decisión final de proceder con un proyecto.
COP26	"Conferencia de las Partes", es la 26ª conferencia de las partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

UNIDADES DE MEDIDA

AEL	Electrolisis alcalina
AEM	Electrolisis de membrana de intercambio aniónico
ATR	Reformado autotérmico
AVH	Aceites vegetales tratados con hidrógeno
BF-BOF	Alto horno con convertidor básico al oxígeno
CCS	Captura y almacenamiento de carbono
CCU	Captura y utilización de carbono
CCUS	Captura, utilización y almacenamiento de carbono
CO2	Dióxido de carbono
CO2-eq	Equivalente de dióxido de carbono
°C	Grados centígrados
DRI	Hierro sometido a reducción directa
DRI-EAF	Horno de arco eléctrico que utiliza hierro de reducción directa
FV	Fotovoltaica
GEI	Gases de efecto invernadero
GN3	Amoniaco
GNC	Gas natural comprimido
GNL	Gas natural licuado
GW	Gigavatios
GPM	Galones por minuto
H2O	Agua
H2	Hidrógeno
h	Hora
Kg	Kilogramo
kg/hora	Kilogramos por hora
Km	kilómetro
km2	kilómetro cuadrado
kt	Miles de toneladas
kT	Kilotonelada
kTon	Kilotonelada- katon
kW	kilovatio
kWe	kilovatio eléctrico
lb/h	libras por hora
kWh	Kilovatio hora
LCOH	LCOH
LHV	Valor calorífico inferior
MBtu	Millones de unidades térmicas británicas
MeOH	Metanol
MMC	Millones de metros cúbicos
MEP	Membrana electrolítica polimérica

MMBTU/hora	Millones de unidades térmicas británicas por hora (poder calorífico)
Mt	Megatoneladas
MW	Megavatios
MWh	Megavatios hora
MMSCFD	Millones de pies cúbicos estándar por día
Nm ³ /h	Metros cúbicos normales por hora
NG	gas natural
Nm ³ H ₂ /h	Hidrógeno a una tasa de 40 metros cúbicos normales por hora
PEM	Electrolisis de membrana de electrolisis de polímero
RMP	Recuperación mejorada de petróleo
RMV	Reformado de metano con vapor
SMR	Reformado de Metano con Vapor de Agua
SOEC	Celda de electrolisis de óxido solido
TWh/año	teravatios-hora al año
t	Tonelada
TPA	Toneladas anuales