



DEPARTAMENTO DE
INGENIERIA COMERCIAL
UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

Departamento de Ingeniería Comercial

**ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LA INDUSTRIA
DEL HIDRÓGENO VERDE EN CHILE:
UNA MIRADA GENERAL AL CONTEXTO NACIONAL
Y SUS OPORTUNIDADES DE NEGOCIO**

Memoria de Pregrado presentada por

WIELAND NICOLÁS WRIGGE FUENTES

Como requisito para optar al Título Profesional de

Ingeniero Comercial

Profesor Guía: Joaquín Vergara Bengoechea

Profesor Correferente: Macarena Gatica Silva

Diciembre 2024

AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar agradeciendo a mis padres, por la crianza que me dieron, por su amor incondicional, por postergarse con la finalidad de que sus hijos prosperen y sean grandes personas, por darme la oportunidad de estudiar y estar escribiendo esto. Yo sé que no son perfectos, porque dudo que exista la perfección, pero sin duda son los mejores papás que la vida me pudo haber brindado y sé que han dado todo y más por mí. Estaré eternamente agradecido por cada cosa que han hecho y espero poder devolverles todo aportando con mi granito de arena a este mundo.

A mis abuelos, que si bien no les gusta que los llamen así, no han tenido otra preocupación que la de brindar amor y querer ver bien a sus nietos, esto igual es para ustedes, porque los sentí conmigo cada día de estos 5 años que duró el estudio y los traeré conmigo hasta la eternidad.

Al resto de mi familia y amigos, que ellos ya saben que son familia también, agradecerles por la preocupación y los momentos felices, por siempre estar y por cada aventura que hemos vivido y que atesoraré, al igual que su incansable cariño.

Finalmente, agradecer a Paulina Ruiz, mi fiel compañera en esta aventura llamada vida, gracias por ser mi impulso y motivación, por llenar la vida de colores, por cada noche en que nos desvelamos estudiando, por las risas y los momentos en que necesité un hombro cuando no podía más. Solo tú y yo sabemos todo lo que pasamos llegar aquí y le agradezco al mundo el que te haya puesto en mi camino, esto es solo un paso más de muchos que nos quedan.

Gracias totales.

RESUMEN EJECUTIVO

La presente memoria tiene como finalidad abordar desde una mirada general la situación actual de la emergente industria de hidrógeno verde en Chile, focalizando los principales puntos en distintos análisis para tener una visión de lo que podría ser una futura y prometedora industria para el país.

El propósito principal de esta investigación es construir una guía integral sobre el marco actual de la industria del hidrógeno verde en Chile, analizando los factores clave que influyen en su desarrollo. Este trabajo busca proporcionar una herramienta informativa que permita a interesados, tanto del ámbito público como privado, introducirse en el panorama nacional del hidrógeno verde. Entre los objetivos específicos, se destaca la identificación del potencial que presenta Chile en este sector, subrayando las oportunidades para diversos actores. Además, se pretende ofrecer una visión clara del posicionamiento internacional del país en cuanto a la producción y uso de hidrógeno verde, al mismo tiempo que se busca contribuir al impulso de una industria emergente que podría tener un impacto positivo en la economía chilena. Finalmente, la investigación también busca promover prácticas más sostenibles, alineadas con la creciente preocupación global sobre la emergencia medioambiental.

La metodología empleada en esta investigación es de enfoque documental y descriptivo, centrada en la recopilación y análisis de información existente sobre la industria del hidrógeno verde en Chile. Se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica de fuentes académicas, informes gubernamentales, documentos de organismos internacionales y publicaciones especializadas, con el objetivo de ofrecer una visión clara y detallada del panorama actual de esta industria en el contexto nacional. A través de este análisis, se identificaron y categorizaron los principales desafíos y oportunidades en el sector, además de realizarse una comparación con otros países que también están desarrollando el hidrógeno verde, con el fin de contextualizar la realidad chilena en un marco global. La investigación no incluyó la recolección de datos primarios, sino que se apoyó en la revisión de literatura relevante y actualizada, garantizando la calidad y pertinencia de la información utilizada. El diseño metodológico busca proporcionar un análisis riguroso y sistemático que aporte al entendimiento integral del estado y las perspectivas futuras de la industria del hidrógeno verde en Chile.

Chile se enfrenta a un desafío significativo en cuanto al desarrollo de una industria innovadora propia, teniendo la oportunidad de aprovechar un potencial único para convertirse en líder global en la generación y exportación de hidrógeno verde. Gracias a sus abundantes recursos naturales y condiciones geográficas y climáticas excepcionales, el país tiene una ventaja competitiva para producir hidrógeno verde de manera eficiente y sostenible, principalmente mediante el aprovechamiento de la energía solar y eólica. Este contexto configura una oportunidad clave para el país, ya que el desarrollo de esta industria podría transformar su economía, diversificar sus fuentes de ingresos y reducir su dependencia de los sectores tradicionales. Además, la producción de hidrógeno verde fortalecería la seguridad energética del país, permitiéndole depender menos de los combustibles fósiles importados. Desde una perspectiva ambiental, la transición hacia el hidrógeno verde no solo contribuiría a la lucha contra el cambio climático, sino que también ofrecería beneficios locales, como la mejora de la calidad del aire y la salud ambiental. En este sentido, la inversión en este sector emergente no solo sería una palanca de crecimiento económico, sino también una medida crucial para la sostenibilidad y la resiliencia del país a largo plazo.

El principal aporte de esta tesis radica en la identificación y análisis exhaustivo de las oportunidades y desafíos que enfrenta Chile para convertirse en un líder global en la industria del hidrógeno verde. A través de un enfoque multidisciplinario, se ha destacado el potencial único del país, que posee una abundancia de recursos renovables, en particular la energía solar y eólica, esenciales para la producción de hidrógeno verde a bajo costo. Este trabajo contribuye al entendimiento de cómo la combinación de políticas públicas favorables, la innovación tecnológica y la inversión en infraestructura pueden acelerar el desarrollo de esta industria estratégica, lo que podría posicionar a Chile no solo como un referente en la transición energética, sino también como un actor clave en el mercado global de energía limpia.

Adicionalmente, la tesis proporciona un análisis detallado sobre los impactos sociales, económicos y ambientales que generará la expansión de la industria del hidrógeno verde en el país. El estudio subraya la importancia de una transición energética inclusiva que promueva la equidad social, creando nuevas oportunidades de empleo, capacitación y desarrollo regional, especialmente en zonas como Magallanes y el Valle Central. Asimismo, se resalta el impacto positivo de esta industria en la reducción de las emisiones de carbono y su contribución a la

descarbonización de sectores industriales y de transporte. Este trabajo ofrece valiosas recomendaciones para superar los desafíos de producción y infraestructura, con el fin de consolidar a Chile como un referente mundial en la producción de hidrógeno verde y contribuir a la lucha global contra el cambio climático.

ABSTRACT

This thesis aims to provide a general overview of the current situation of the emerging green hydrogen industry in Chile, focusing on the key aspects through various analyses to gain insight into what could become a future and promising industry for the country.

The main purpose of this research is to create a comprehensive guide on the current framework of the green hydrogen industry in Chile, analyzing the key factors influencing its development. This work seeks to provide an informative tool for stakeholders, both from the public and private sectors, to understand the national landscape of green hydrogen. Among its specific objectives, it highlights identifying the potential Chile has in this sector, emphasizing the opportunities for various actors. Additionally, it aims to offer a clear perspective on the country's international positioning regarding the production and use of green hydrogen, while also contributing to the promotion of an emerging industry that could positively impact the Chilean economy. Finally, the research also seeks to encourage more sustainable practices, in line with the growing global concern over environmental emergencies.

The methodology employed in this research is documentary and descriptive in nature, focusing on the collection and analysis of existing information about the green hydrogen industry in Chile. A thorough literature review was conducted, including academic sources, government reports, documents from international organizations, and specialized publications, with the aim of providing a clear and detailed view of the current state of this industry in the national context. Through this analysis, the main challenges and opportunities in the sector were identified and categorized, and a comparison was made with other countries also developing green hydrogen, in order to contextualize Chile's reality within a global framework. The research did not include primary data collection but relied on the review of relevant and up-to-date literature, ensuring the quality and relevance of the information used. The methodological design aims to provide a rigorous and systematic analysis that contributes to a comprehensive understanding of the current state and future perspectives of the green hydrogen industry in Chile.

Chile faces a significant challenge in developing its own innovative industry, while having the opportunity to capitalize on a unique potential to become a global

leader in the generation and export of green hydrogen. Thanks to its abundant natural resources and exceptional geographical and climatic conditions, the country holds a competitive advantage in producing green hydrogen efficiently and sustainably, mainly through the use of solar and wind energy. This context creates a key opportunity for the country, as the development of this industry could transform its economy, diversify its sources of income, and reduce its dependence on traditional sectors. Furthermore, the production of green hydrogen would strengthen the country's energy security, reducing its reliance on imported fossil fuels. From an environmental perspective, the transition to green hydrogen would not only contribute to the fight against climate change but also offer local benefits, such as improved air quality and environmental health. In this regard, investing in this emerging sector would not only be an economic growth lever but also a crucial measure for the long-term sustainability and resilience of the country.

The main contribution of this thesis lies in the identification and thorough analysis of the opportunities and challenges Chile faces in becoming a global leader in the green hydrogen industry. Through a multidisciplinary approach, the unique potential of the country has been highlighted, given its abundance of renewable resources, particularly solar and wind energy, which are essential for producing green hydrogen at a low cost. This work contributes to understanding how the combination of favorable public policies, technological innovation, and investment in infrastructure can accelerate the development of this strategic industry, positioning Chile not only as a leader in the energy transition but also as a key player in the global clean energy market.

Additionally, the thesis provides a detailed analysis of the social, economic, and environmental impacts that the expansion of the green hydrogen industry will generate in the country. The study emphasizes the importance of an inclusive energy transition that promotes social equity, creating new employment, training, and regional development opportunities, particularly in areas such as Magallanes and the Central Valley. Furthermore, it highlights the positive impact of this industry on reducing carbon emissions and its contribution to the decarbonization of industrial and transportation sectors. This work offers valuable recommendations to overcome production and infrastructure challenges, with the goal of consolidating Chile as a global reference in green hydrogen production and contributing to the global fight against climate change.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	2
RESUMEN EJECUTIVO	3
ABSTRACT	6
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	12
2. OBJETIVOS.....	13
2.1. Objetivo general.....	13
2.2. Objetivos específicos	13
3. ALCANCE GENERAL	13
4. MARCO TEÓRICO	14
4.1. Definición de hidrógeno verde	14
4.2. Proceso de electrólisis.....	15
4.3. Energías renovables en Chile.....	18
4.3.1. Energía solar	19
4.3.1.1. Energía solar fotovoltaica.....	20
4.3.1.2. Energía solar térmica	21
4.3.2. Energía eólica.....	22
4.4. Industria eléctrica del país	23
4.5. Enfoque del gobierno respecto al hidrógeno verde	25
4.6. Dónde está Chile respecto a la industria internacional	28
4.7. Colaboraciones y Asociaciones Estratégicas	30
4.7.1. Cooperación Internacional	30
4.7.2. Alianzas Público-Privadas.....	31
4.7.3. Colaboración con Universidades e Instituciones de Investigación	31
4.7.4. Participación en Redes Internacionales	32
4.8. Aplicaciones del hidrógeno verde	33
5. METODOLOGÍA	35
6. ANÁLISIS PESTEL.....	36
6.1. Político.....	36
6.1.1. Políticas Gubernamentales y Regulaciones.....	36
6.1.2. Incentivos y Subsidios.....	37
6.2. Económico	38
6.2.1. Costos de Producción	38

6.2.2. Inversiones y Financiación	42
6.2.3. Impacto en el Empleo y Crecimiento Económico	45
6.3. Social.....	46
6.3.1. Impacto en Comunidades Locales	46
6.3.2. Equidad de género	46
6.3.3. Educación y Capacitación	46
6.4. Tecnológico.....	48
6.4.1. Infraestructura de Almacenamiento y Distribución	48
6.4.2. Investigación y Desarrollo	50
6.5. Ecológico	51
6.5.1. Impacto Ambiental Positivo	51
6.5.2. Uso de Recursos Naturales	51
6.6. Legal.....	52
6.6.1. Regulación Ambiental	52
6.6.2. Regulación Energética	53
6.6.3. Regulación de Seguridad y Salud	54
6.6.4. Regulación de Transporte y Logística	55
6.6.5. Regulación de Explotación y Permisos Especiales.....	55
6.6.6. Regulación Económica y Financiera	56
6.6.7. Cumplimiento de Normas Internacionales	56
7. ANÁLISIS FODA	56
7.1. Fortalezas	56
7.2. Oportunidades	57
7.3. Debilidades	58
7.4. Amenazas.....	59
8. ANÁLISIS DEL MERCADO	60
8.1. Demanda actual y futura de hidrógeno.....	60
8.2. Oferta actual y futura de hidrógeno	64
9. DESARROLLO DE PROYECTOS Y CASOS ACTUALES.....	67
9.1. Uso de terrenos públicos	67
9.2. Infraestructura de transporte y logística.....	69
9.2.1. Pasos fronterizos	69
9.2.2. Red de aeropuertos	71

9.2.3. Redes marítimas	72
9.2.4. Redes ferroviarias	73
9.3. Regulación de proyectos	74
9.4. Regiones estratégicas para desarrollo de proyectos	77
9.4.1. Región de Magallanes	77
9.4.2. Región de Antofagasta	77
9.4.3. Región del Bio Bio.....	78
9.4.4. Valle central.....	79
9.5. Casos	79
9.5.1. Proyecto HNH Energy	79
9.5.2. Proyecto Haru Oni.....	82
9.5.3. Proyecto Volta	83
10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	84
REFERENCIAS	88
ANEXOS	91
Anexo 1. Entrevista a director general del proyecto HNH Energy, Mario Marchese.	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	15
<i>Proceso de electrólisis</i>	15
Figura 2:	18
<i>Mapa de países con manifestación de interés</i>	18
Figura 2:	24
<i>Consumo Final de Energía en Chile, 2022.</i>	24
Figura 4:	35
<i>Potencial de descarbonización del hidrógeno verde</i>	35
Figura 5:	48
<i>Fortalecimiento y desarrollo de capital humano</i>	48
Figura 6:	62
<i>Demanda de hidrógeno por sector y región 2019-2030</i>	62
Figura 7:	66
<i>Mapa de proyectos en desarrollo septiembre 2024</i>	66
Figura 8:	73
<i>Mapa de rutas marítimas chilenas 2023</i>	73
Figura 9:	74
<i>Mapa red ferroviaria de Chile</i>	74
Figura10:	81
<i>Producción de amoníaco verde en HNH Energy</i>	81

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Chile se encuentra al debe en cuanto al desarrollo de una industria propia e innovadora y el potencial para convertirse en un líder en la generación y exportación de hidrógeno verde es un tema de creciente relevancia y trascendencia. Este país posee una combinación única de recursos naturales, condiciones climáticas y geográficas que lo posicionan favorablemente en el mercado global emergente del hidrógeno verde. La vasta disponibilidad de energía solar y eólica en diversas regiones chilenas no solo permite una producción eficiente y sostenible de hidrógeno verde, sino que también ofrece una oportunidad para que Chile lidere en la transición hacia fuentes de energía más limpias. Este contexto configura un escenario favorable para el desarrollo de una nueva industria nacional que podría transformar significativamente la economía del país.

Al diversificar sus fuentes de ingresos y desarrollar tecnologías avanzadas en este sector, Chile no solo podría reducir su dependencia de las industrias tradicionales, sino también posicionarse como un líder en la exportación de hidrógeno a mercados internacionales. Esta expansión económica, impulsada por la generación y exportación de hidrógeno verde, podría crear numerosos empleos y estimular el crecimiento de sectores industriales relacionados, promoviendo así una prosperidad económica más inclusiva y sostenible.

Además, el desarrollo de la industria del hidrógeno verde contribuiría significativamente a la independencia energética de Chile. Al producir hidrógeno a partir de fuentes renovables locales, el país podría reducir su dependencia de combustibles fósiles importados, lo que no solo fortalecería su seguridad energética, sino que también mejoraría su posición estratégica en el ámbito global. Esta mayor autonomía energética sería beneficiosa para la estabilidad económica y política del país, proporcionando una base sólida para el desarrollo a largo plazo y la resiliencia ante fluctuaciones en los mercados internacionales de energía.

Desde una perspectiva ambiental, la transición hacia el hidrógeno verde representa un avance crucial en la lucha contra el cambio climático. Al adoptar esta tecnología, Chile no solo contribuiría a la reducción global de emisiones, sino que también mejoraría la calidad del aire y la salud ambiental a nivel nacional. Así, la inversión en hidrógeno verde no solo impulsaría el desarrollo económico y la

independencia energética del país, sino que también jugaría un papel vital en la preservación del medioambiente para las generaciones futuras.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Construir una guía general del marco actual y cómo funciona la industria del hidrógeno verde en Chile, evaluando los factores que influyen en el desarrollo de esta industria. Lo cual permita a las personas interesadas en este tema a introducirse y obtener información respecto al panorama nacional en este ámbito.

2.2. Objetivos específicos

- Mostrar el potencial que existe a nivel país en esta materia, haciendo énfasis en las oportunidades para públicos y privados.
- Generar una imagen clara del posicionamiento actual de Chile a nivel internacional en cuanto al hidrógeno verde.
- Ayudar a impulsar el desarrollo de una nueva industria nacional que impactaría directamente en la economía chilena.
- Dar a conocer prácticas más sustentables bajo el contexto de emergencia medioambiental que se está pasando a nivel global.

3. ALCANCE GENERAL

Esta investigación explora la industria del hidrógeno verde en Chile, enfocándose en su contexto actual, desarrollo y el impacto que puede tener en el país. El estudio se centra en cómo esta industria emergente influye en diferentes aspectos del contexto nacional.

En términos sociales, el análisis considera cómo la adopción del hidrógeno verde afecta a toda la población chilena, con especial atención a la mano de obra calificada que se requiere para su crecimiento y funcionamiento. Geográficamente, la investigación abarca todo Chile, dado que el potencial del hidrógeno verde tiene implicaciones en diversas regiones del país.

El estudio menciona factores que podrían afectar económicamente a nivel nacional, como, por ejemplo, reducir la necesidad de importar petróleo y a la vez

aumentar las exportaciones de esta materia prima, además de generar nuevos empleos.

El enfoque de la investigación es explicativo, ya que se basa en el análisis de informes y estudios previos para ofrecer una comprensión más profunda de cómo el hidrógeno verde podría transformar la economía y el mercado laboral en Chile.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Definición de hidrógeno verde

Cuando se habla sobre el hidrógeno es necesario contextualizar que se está frente al elemento químico más abundante y ligero del universo, con el símbolo químico H y el número atómico 1 constituye cerca de un 75% de toda la materia. Es un gas incoloro, inodoro e inflamable en condiciones estándar. En la tabla periódica, se encuentra en el primer grupo y es el primer elemento, debido a su simple estructura atómica compuesta por un solo protón y electrón. En la Tierra, el hidrógeno no se encuentra en su forma elemental, sino que suele combinarse con otros elementos. Por ejemplo, forma parte de la molécula del agua (H₂O) y de numerosos compuestos orgánicos si se mezcla con carbono. El hidrógeno tiene un papel crucial en la ciencia y la tecnología moderna, se utiliza en la producción de amoníaco para fertilizantes, en la refinación de petróleo y como potencial fuente de energía limpia. En el ámbito de la energía, el hidrógeno es considerado una solución prometedora para el almacenamiento de esta y como combustible en pilas, contribuyendo a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y al avance hacia una economía más sostenible.

Dado la condición anteriormente mencionada de que no se encuentra en su forma elemental, es necesario romper las moléculas en las que existe hidrógeno y esto se puede realizar mediante tres métodos diferentes. Termólisis, donde se divide la molécula de agua en hidrógeno y oxígeno mediante energía térmica. Electrólisis, en que se repite el proceso anterior, pero mediante energía eléctrica. Y finalmente el reformado y gasificación, donde por medio de reacciones químicas convierten los combustibles orgánicos y fósiles en hidrógeno liberando CO₂.

Se han designado colores para definir como se consigue el hidrógeno y el impacto en el medio ambiente de este proceso, fundamentado en el tipo de energía

que utilicen para llevar a cabo los métodos anteriormente mencionados. Cuando se hace a través de combustibles fósiles (carbón, gas natural) es lo que se entiende como hidrógeno gris, ya que es el más contaminante y hoy en día es como se produce cerca del 95% de este. Cuando se utilizan energías renovables para llevar a cabo los métodos, se hablará de hidrógeno verde el cual tiene emisiones de GEI nulas o muy bajas. (García Bernal, 2024)

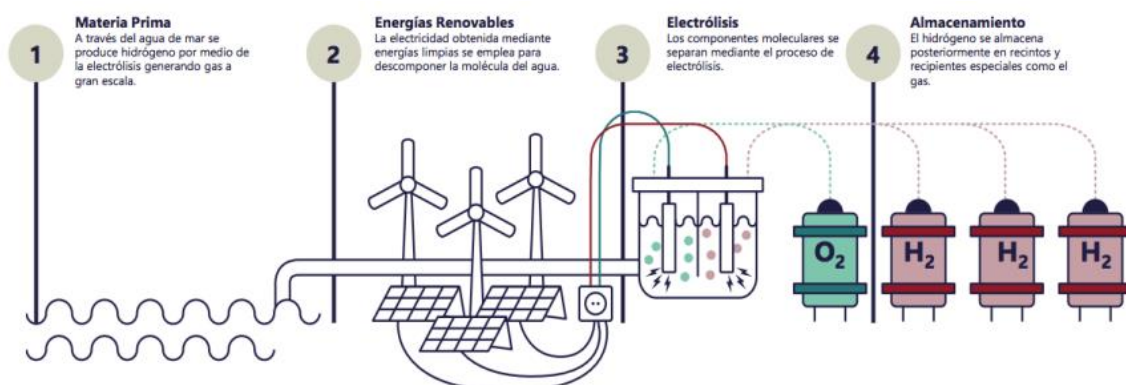
4.2. Proceso de electrólisis

El proceso de electrólisis del agua con energía renovable comienza con la conversión de fuentes de energía limpia en electricidad, utilizando paneles fotovoltaicos para aprovechar la energía solar, aerogeneradores para capturar la energía eólica, turbinas en presas para generar electricidad a partir de la energía hidroeléctrica, y calor terrestre para producir electricidad mediante energía geotérmica.

Este se lleva a cabo en un electrolizador, que consta de dos electrodos (ánodo y cátodo) sumergidos en una celda electrolítica llena de agua, a menudo con un electrolito añadido para mejorar la conductividad. Cuando se aplica una corriente eléctrica, el agua se descompone: en el ánodo se libera oxígeno y en el cátodo se libera hidrógeno.

Figura 1:

Proceso de electrólisis



(Ministerio de Energía, 2020)

Existen varios tipos de electrólisis, cada uno adecuado para distintas aplicaciones y tecnologías. Los principales tipos son:

1. **Electrólisis Alcalina:** Utiliza una solución de hidróxido de potasio (KOH) o sodio (NaOH) como electrolito. Es uno de los métodos más antiguos y económicos para la producción de hidrógeno, aunque generalmente menos eficiente en términos de energía comparado con tecnologías más modernas. Puede utilizarse con energía renovable, especialmente en grandes instalaciones donde la eficiencia de costos es importante. La energía solar o eólica puede ser utilizada para alimentar el electrolizador, produciendo hidrógeno verde a gran escala.
2. **Electrólisis de Membrana de Intercambio de Protones (PEM):** Emplea una membrana de polímero como electrolito, que permite la separación de los gases producidos y proporciona alta eficiencia y flexibilidad. Es especialmente adecuada para integrarse con fuentes de energía renovable intermitentes, como la solar y la eólica, debido a su capacidad para manejar variaciones en la carga de manera eficiente. Además, la alta pureza del hidrógeno producido es beneficiosa para aplicaciones que requieren hidrógeno de alta calidad.
3. **Electrólisis de Óxido Sólido (SOEC):** Utiliza un electrolito sólido, generalmente un óxido cerámico, y opera a altas temperaturas (600-1000°C). Esto permite una mayor eficiencia energética y la posibilidad de utilizar calor residual en la producción de hidrógeno, haciendo el proceso más eficiente en términos de energía. Este tipo de electrólisis puede ser alimentado por energía renovable en combinación con calor residual o energía térmica, mejorando la eficiencia global del proceso.
4. **Electrólisis de Membrana de Intercambio de Aniones (AEM):** Emplea una membrana que intercambia aniones en lugar de protones. Es una tecnología emergente que combina algunos de los beneficios de la electrólisis alcalina y la PEM, ofreciendo un equilibrio entre coste y rendimiento. Al igual que con las otras tecnologías, el AEM puede usar electricidad de fuentes renovables para producir hidrógeno verde. (Cancino Silva, 2021)

La recuperación y almacenamiento de hidrógeno implica la separación y purificación de los gases generados (hidrógeno y oxígeno) para eliminar impurezas, y el almacenamiento del hidrógeno en formas adecuadas, como gas comprimido,

líquido o en compuestos químicos, utilizando tanques de alta presión o sistemas criogénicos para asegurar su conservación y disponibilidad.

La combinación de electrólisis del agua con energía renovable representa una solución prometedora para la producción de hidrógeno verde y sostenible, esencial para la transición hacia una economía más limpia y respetuosa con el medio ambiente.

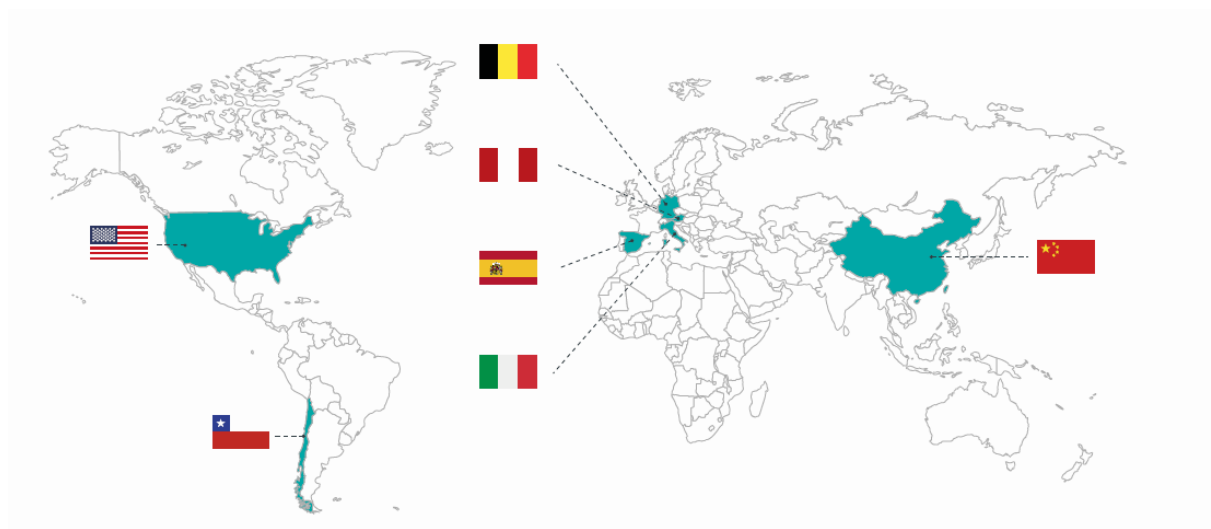
En cuanto a los electrolizadores utilizados para este proceso y a modo de impulsar esta prometedora industria, es que el Comité de desarrollo de la industria de Hidrógeno verde de CORFO ha elaborado un proceso llamado *Request for Information* de electrolizadores para poder encontrar empresas interesadas en fabricar o ensamblar electrolizadores y sus sistemas auxiliares en Chile a modo de abastecer el mercado nacional.

El Comité colaboró en conjunto con InvestChile y diversos entes público-privados, tanto a nivel nacional como internacional. Finalmente, se obtuvieron nueve expresiones de interés para llevar a cabo varios proyectos de fabricación de electrolizadores en el país, de los cuales 3 provenían de proveedores locales en Chile y 6 provenían de compañías internacionales.

Seis de las manifestaciones de interés proponen el establecimiento de instalaciones de producción de 0,5GW a 1GW de electrolizadores de capacidad anual. Con estimadas inversiones de entre 50 y 100 millones de dólares, fluctuando las tecnologías entre electrolizadores alcalinos (ALK), electrolizadores de membrana protónica polimérica (PEM) y electrolizadores de óxido sólido (SOEC). (Gobierno de Chile, 2024)

Figura 2:

Mapa de países con manifestación de interés



(Gobierno de Chile, 2024)

4.3. Energías renovables en Chile

Las energías renovables son una categoría de fuentes de energía que provienen de recursos naturales capaces de regenerarse de forma continua y son la base de producción para el hidrógeno verde. A diferencia de los combustibles fósiles, cuya extracción y uso contribuyen al cambio climático y a la degradación ambiental, las energías renovables ofrecen una alternativa más limpia y sostenible. Entre estas fuentes se encuentran la energía solar, eólica, hidroeléctrica, geotérmica y la biomasa. Estas tecnologías no solo ayudan a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también promueven la creación de empleo y reducen la dependencia de las importaciones energéticas.

El impacto positivo de las energías renovables se manifiesta en múltiples áreas, desde la preservación del medio ambiente hasta la estabilidad económica. La transición hacia estas fuentes de energía no solo es crucial para combatir el calentamiento global, sino que también impulsa el desarrollo de nuevas industrias y oportunidades de negocio. La adopción de estas tecnologías varía según las características y recursos disponibles en cada región, lo que permite adaptar las soluciones a las necesidades locales y potencialidades específicas.

En el caso de Chile, el país ha demostrado un notable compromiso con las energías renovables, aprovechando al máximo sus recursos naturales únicos. La radiación solar en el desierto de Atacama es de las más intensas del mundo, lo que convierte a la energía solar en una opción altamente eficiente para la generación de electricidad. En el sur, la fuerza del viento ofrece un gran potencial para la energía eólica. Estos recursos han permitido al país avanzar significativamente en la implementación de tecnologías renovables, consolidándose como un líder en la transición hacia una matriz energética más sostenible en América Latina.

También es fundamental tener en cuenta el compromiso de cerrar y reconvertir las plantas de generación de carbón, las cuales deberán cesar sus operaciones para el año 2040, de acuerdo con los plazos establecidos en el Plan de Descarbonización. Esta capacidad será sustituida por energías renovables no convencionales y sistemas de almacenamiento.

Hasta diciembre de 2022, la capacidad total de generación de energía en Chile alcanzó los 33,4 GW, de los cuales el 62% proviene de fuentes renovables. Además, hay más de 6,2 GW en proyectos que están en construcción. Las estimaciones sugieren que Chile posee un potencial para utilizar fuentes renovables que es más de 80 veces superior a la demanda actual de energía interna del país. (Gobierno de Chile, 2024)

Las principales energías renovables utilizadas para la generación de hidrógeno verde son la solar y la eólica, que se detallan a continuación:

4.3.1. Energía solar

Hablamos de una fuente de energía renovable que aprovechamos a partir de la radiación del sol. Esta forma de energía es cada vez más popular debido a su sostenibilidad y al bajo impacto ambiental que tiene en comparación con las fuentes de energía tradicionales.

En Chile, la energía solar encuentra un escenario ideal para su desarrollo, gracias a sus excepcionales condiciones climáticas. El país es hogar del desierto de Atacama, una de las regiones más soleadas y secas del planeta. Este desierto recibe la mayor cantidad de radiación solar del mundo, lo que convierte a Chile en un lugar excepcional para la energía solar. En algunas áreas, la radiación solar puede superar

los 2,500 kilowatt-hora por metro cuadrado al año, ofreciendo un gran potencial para generar electricidad de manera eficiente. La energía solar se distingue en dos tipos, detallados a continuación:

4.3.1.1. Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es una forma de energía renovable que convierte la luz solar en electricidad mediante el efecto fotoeléctrico. Este proceso se basa en el uso de células fotovoltaicas, que son dispositivos semiconductores capaces de absorber los fotones de la luz solar y liberar electrones, generando así una corriente eléctrica. Las células fotovoltaicas pueden estar hechas de diferentes tipos de materiales semiconductores, como el silicio monocristalino, policristalino y el silicio amorfo. Las células de silicio monocristalino tienen la mayor eficiencia, alrededor del 18% al 20%, mientras que las de silicio policristalino tienen una eficiencia ligeramente menor, entre el 16% y el 17.5%. Las células de silicio amorfo, aunque más económicas, tienen una eficiencia baja, entre el 8% y el 9%.

Las plantas fotovoltaicas se dividen en dos categorías principales: conectadas a la red y fuera de la red. Las instalaciones conectadas a la red pueden ser plantas fotovoltaicas que envían toda la energía generada a la red eléctrica, o generadores con autoconsumo, donde parte de la electricidad se usa directamente y el resto se inyecta en la red. Estas instalaciones conectadas a la red incluyen tres componentes esenciales: paneles fotovoltaicos que capturan la radiación solar, inversores que convierten la corriente continua producida en corriente alterna, y transformadores que elevan el voltaje de la electricidad generada para su distribución.

Por otro lado, las instalaciones fuera de la red suelen ubicarse en áreas remotas y requieren componentes adicionales como baterías para almacenar la energía generada y controladores para evitar sobrecargas. Estas plantas permiten el funcionamiento autónomo en lugares sin acceso a la red eléctrica.

La energía solar fotovoltaica ofrece numerosas ventajas. Es una fuente de energía 100% renovable, inagotable y no contaminante, que no requiere combustibles ni genera residuos. Es modular y adaptable a diferentes escalas, desde grandes plantas solares hasta pequeños paneles residenciales. También permite el almacenamiento de electricidad en baterías, lo que resulta útil en áreas aisladas o rurales. (Iberdrola, s.f.)

4.3.1.2. Energía solar térmica

La energía solar térmica se basa en la recolección y concentración de la luz solar para producir altas temperaturas necesarias para generar electricidad. Este tipo de sistema utiliza colectores solares con dos componentes principales: reflectores que capturan y concentran la luz y un receptor que la recibe. La mayoría de los sistemas solares térmicos emplean un fluido de transferencia de calor que se calienta en el receptor y se circula para producir vapor. Este vapor se usa para accionar una turbina, que a su vez genera electricidad.

Los sistemas de energía solar térmica pueden tener un sistema de almacenamiento de energía térmica que almacena el calor durante el día para producir electricidad durante la noche o en condiciones de nubosidad. Además, algunos sistemas solares térmicos son híbridos y utilizan combustibles adicionales, como el gas natural, para complementar la energía solar durante períodos de baja radiación solar.

Existen tres tipos principales de sistemas de energía solar térmica concentrada:

1. **Sistemas de Concentración Lineal:** Incluyen los espejos parabólicos y los reflectores lineales de Fresnel. Los sistemas de concentración lineal usan espejos largos y curvados para enfocar la luz solar en tubos receptores que corren a lo largo de los espejos. El fluido calentado en estos tubos se envía a un intercambiador de calor para producir vapor que acciona una turbina. Los espejos parabólicos tienen un diseño en forma de parábola que concentra la luz solar en una línea focal. Los reflectores lineales de Fresnel, por otro lado, utilizan varios espejos planos o ligeramente curvados para enfocar la luz en un tubo receptor situado sobre los espejos.
2. **Torres Solares:** Estos sistemas utilizan un campo de espejos planos, llamados heliostatos, que rastrean el sol y concentran la luz en un receptor ubicado en la cima de una torre. La luz concentrada puede aumentar hasta 1,500 veces su intensidad original. Algunos sistemas de torre solar emplean sales fundidas como fluido de transferencia de calor debido a su alta capacidad de almacenamiento y transferencia de calor, lo que permite generar electricidad durante la noche o en días nublados.

3. **Sistemas de Plato Solar/Engine:** Utilizan un plato reflectante en forma de disco que concentra la luz solar en un receptor térmico. Este calor se transfiere a un motor generador, comúnmente un motor Stirling, que convierte la energía térmica en energía mecánica para generar electricidad. Los sistemas de plato solar tienen una alta relación de concentración y pueden alcanzar temperaturas de trabajo superiores a 1,380°F.

Cada tipo de sistema solar térmico tiene aplicaciones y ventajas específicas dependiendo de su diseño y capacidad de almacenamiento. Los sistemas de concentración lineal son comunes en grandes instalaciones solares, mientras que las torres y los platos solares están en diversas etapas de desarrollo y operación en distintos lugares del mundo. (U.S. Energy Information Administration, 2024)

4.3.2. Energía eólica

Chile ha emergido como un líder en el desarrollo de la energía eólica en América del Sur, aprovechando su potencial eólico excepcional debido a su geografía única. Desde el inicio del siglo XXI, Chile ha experimentado un notable crecimiento en la capacidad instalada de energía eólica. Este crecimiento ha sido impulsado por un marco regulatorio favorable, políticas gubernamentales de apoyo y la disminución de los costos de tecnología eólica.

La capacidad instalada eólica en Chile ha aumentado significativamente en la última década. Según datos de la Comisión Nacional de Energía (CNE) y otros informes, Chile contaba con más de 2,500 MW de capacidad eólica al final de 2023. Esta capacidad se encuentra principalmente en el sur del país, donde se localizan los parques eólicos más grandes, como el Parque Eólico de San Juan de la Costa y el Parque Eólico de El Romero.

La energía eólica se basa en convertir la energía cinética del viento en electricidad. En los aerogeneradores modernos, el viento hace girar las palas del rotor, transformando la energía cinética en energía rotacional. Esta energía rotacional se transfiere a un generador a través de un eje, produciendo así energía eléctrica.

La capacidad de los aerogeneradores ha aumentado con el tiempo. En 1985, los aerogeneradores típicos tenían una capacidad nominal de 0.05 MW y un diámetro

de rotor de 15 metros. Los proyectos eólicos actuales cuentan con aerogeneradores con capacidades de 3-4 MW en tierra y de 8-12 MW en el mar.

La cantidad de energía que se puede aprovechar del viento depende del tamaño del aerogenerador y la longitud de sus palas. La producción de energía es proporcional a las dimensiones del rotor y al cubo de la velocidad del viento. Teóricamente, cuando la velocidad del viento se duplica, el potencial de energía eólica aumenta por un factor de ocho. (IRENA, 2024)

4.4. Industria eléctrica del país

Esta industria es un sector dinámico y en evolución, caracterizado por su transición hacia una mayor sostenibilidad y está regulado por la Comisión Nacional de Energía (CNE) y la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC). El sistema está dividido en tres áreas principales: generación, transmisión y distribución. Estos últimos mencionados se encuentran bajo un sistema de monopolio mientras que la generación se rige por libre mercado.

Por el lado de la generación, este es el primer eslabón en la cadena del suministro eléctrico. Esta área se encarga de producir la electricidad a partir de diversas fuentes de energía. Los generadores son responsables de operar plantas de energía que transforman recursos naturales en electricidad. Por ejemplo, la Central Fotovoltaica El Romero en la Región de Atacama, con una capacidad instalada de aproximadamente 246 MW, es una de las mayores plantas solares de Chile y ejemplifica cómo los generadores transforman recursos naturales en electricidad.

En cuanto a la transmisión, esta se refiere al transporte de la electricidad generada desde las plantas de generación hasta las áreas donde se consumirá. Este proceso se realiza a través de redes de alta tensión que aseguran que la electricidad llegue con eficiencia a las distintas regiones. Un ejemplo en Chile es la empresa de Transmisión Transelec, que gestiona una amplia red de líneas de alta tensión para llevar la electricidad desde los centros de generación hasta los centros de distribución y grandes consumidores.

Finalmente, la distribución es la última etapa en la cadena del suministro eléctrico. Esta área se encarga de entregar la electricidad desde las redes de transmisión a los consumidores finales, incluyendo hogares, negocios e industrias. La

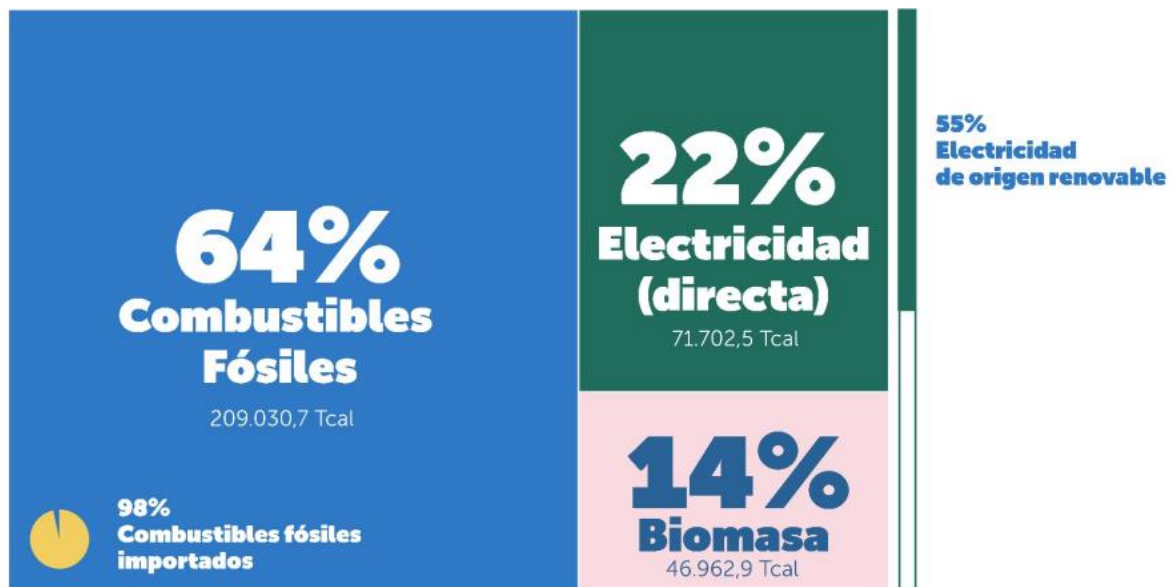
distribución ocurre a través de redes de baja y media tensión. Un caso en el país es ENEL, una de las principales empresas distribuidoras en la Región Metropolitana, que proporciona electricidad a millones de clientes en la capital y sus alrededores.

Es importante destacar que los tres procesos mencionados anteriormente son llevados a cabo por empresas privadas, las cuales se encargan de llevar a cabo sus inversiones y producción.

Respecto a la canasta histórica de consumo energético en Chile, se tienen datos hasta el 2022, los cuales reflejan que somos un país muy dependiente de combustibles fósiles, donde se indica que el 64% de la energía utilizada proviene de estos, siendo un 98% importado desde otros países. Del restante, un 14% de energía proviene de la biomasa y un 22% fue suministrada por electricidad directa. De este total solo un 55% proviene de energías renovables mientras que el restante de fuentes fósiles.

Figura 2:

Consumo Final de Energía en Chile, 2022.



(Gobierno de Chile, 2023)

4.5. Enfoque del gobierno respecto al hidrógeno verde

A partir del año 2020, el gobierno ha promovido el desarrollo del futuro del hidrógeno verde en el país, haciendo énfasis en la potencialidad que se tiene y los pasos para desarrollar una industria que sea capaz de enfrentar el 98% de combustible fósil que se importa para utilización hoy en día. Es por esto por lo que han desarrollado diferentes iniciativas que buscan marcar un camino, las cuales se detallan a continuación:

- **Estrategia nacional de hidrógeno verde (2020):**

Es la estrategia base para desarrollar la industria del hidrógeno verde en el país, con el objetivo de posicionar a Chile como líder global en este sector emergente. El plan busca aprovechar los abundantes recursos naturales de Chile, como la energía solar y eólica, para producir hidrógeno verde de manera económica y competitiva. Entre las metas destacadas se incluye alcanzar una capacidad de 5 gigavatios (GW) de electrolizadores para 2025, lo que permitirá generar grandes volúmenes de hidrógeno verde y reducir significativamente los costos de producción.

Para alcanzar estos objetivos, la estrategia enfatiza el desarrollo de infraestructura esencial, como instalaciones para la producción, almacenamiento y transporte de hidrógeno verde. También se contemplan corredores logísticos para facilitar la exportación a mercados internacionales, especialmente en Europa y Asia. Además, se prevé implementar incentivos fiscales y subsidios para atraer inversiones y financiar la innovación tecnológica en el sector.

La estrategia también promueve la colaboración internacional, fomentando acuerdos y alianzas con países y empresas globales para compartir conocimientos y acceder a nuevos mercados. Asimismo, establece un marco regulatorio para asegurar que el desarrollo del hidrógeno verde sea sostenible y respetuoso con el medio ambiente. Así, Chile no solo busca avanzar en la descarbonización de su matriz energética, sino también convertirse en un referente mundial en la producción de hidrógeno verde, alineándose con las tendencias globales y contribuyendo a la transición hacia una economía de bajas emisiones.

- **Guía hidrogeno verde un proyecto país (2021):**

La guía presenta una serie de enfoques y detalles adicionales que complementan y profundizan la *Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde (2020)*. Mientras que la estrategia nacional estableció las bases y metas generales para el desarrollo del hidrógeno verde, este documento se centra en aspectos más específicos y operativos para avanzar en la implementación del proyecto.

Un aspecto distintivo de esta guía es su enfoque detallado en la estrategia de implementación y en la coordinación institucional donde se subraya la necesidad de una coordinación efectiva entre distintos niveles de gobierno y sectores industriales para asegurar una ejecución fluida de los proyectos de hidrógeno verde. Esto incluye la creación de un comité de coordinación nacional que supervisará y facilitará el avance de los proyectos y políticas asociadas.

Además, el documento de 2021 pone un énfasis especial en el desarrollo de políticas públicas y normativas específicas, que buscan establecer directrices claras para la inversión y la operación en el sector del hidrógeno verde. Se introducen lineamientos regulatorios más detallados, con el objetivo de ofrecer un marco jurídico que respalde tanto la producción como la exportación de hidrógeno verde.

- **Medidas de impulso al Plan de Acción de Hidrógeno Verde 2023-2030 (2023):**

En esta iniciativa se busca un acercamiento de lo que será el *Plan de acción hidrógeno verde 2023-2030 (2024)*, donde se sientan las bases de como se llevará a cabo este proyecto.

Uno de los aspectos clave es la creación de un marco de monitoreo y evaluación para medir el progreso del Plan de Acción. Se establecen indicadores de desempeño y se implementarán sistemas de seguimiento para asegurar que los objetivos del plan se cumplan de manera efectiva. Esta medida busca proporcionar transparencia y permitir ajustes en tiempo real, garantizando que los proyectos avancen conforme a los plazos y objetivos establecidos.

- **Comité estratégico para el plan de acción de hidrógeno verde 2023-2030 (2023):**

Basado en la *Estrategia nacional de hidrógeno verde*, el año 2023, se forma un comité especializado con la finalidad de elaborar el *Plan de acción hidrógeno verde 2023-2030 (2024)*, basándose en cinco dimensiones: ambiental, internacional, económica, capital humano y desarrollo tecnológico, las cuales sirvieron como marco estratégico para la creación de este.

El comité fue integrado por las siguientes personas: Michelle Bachelet (Expresidenta de la República), Jorge Flies (Gobernador Regional de Magallanes y la Antártica Chilena), Ricardo Díaz (Gobernador Regional de Antofagasta), Rosa Devés (Rectora de la Universidad de Chile. Bioquímica de la Universidad de Chile y PhD en Bioquímica de la Universidad de Western Ontario), Hernán de Solminihac (Exministro de Obras Públicas y de Minería. Profesor Titular Ingeniería UC y CLAPES UC. Presidente del Colegio de Ingenieros de Chile), Juan Carlos Jobet (Exministro de Energía y Minería, Decano de la Escuela de Negocios de la Universidad Adolfo Ibáñez), Marcela Angulo (Directora Universidad de Concepción en Santiago. Dra. en Ciencias Ambientales de la Universidad de Concepción), Cristina Dorador (Investigadora titular Centro de Biotecnología y Bioingeniería (CeBiB), doctora en ciencias naturales), Bettina Horst (Directora Ejecutiva de Libertad y Desarrollo. Máster en Economía con Mención en Políticas Públicas de la Universidad Católica), Anahí Urquiza (Investigadora del Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia (CR2) y coordinadora de la Red de Pobreza Energética de la Universidad de Chile).

Dicho comité se formó únicamente para la elaboración del Plan de acción hidrógeno verde 2023-2030 por lo que ya no se encuentra vigente.

- **Plan de acción hidrógeno verde 2023-2030 (2024):**

Sienta los pasos a seguir hasta el 2030 para el desarrollo del hidrógeno verde en Chile, se enfoca en la identificación y promoción de proyectos clave que tendrán un impacto significativo en la industria, incluyendo la priorización de proyectos de infraestructura crítica como estaciones de carga y redes de distribución. Además, se establecen zonas de desarrollo prioritario que concentran los esfuerzos y recursos en áreas con alto potencial para la producción de hidrógeno verde.

Se destaca la estrategia para el fortalecimiento de la cadena de suministro del hidrógeno verde, que incluye la implementación de acuerdos de colaboración con proveedores internacionales y el desarrollo de una red de suministro robusta. Se promueve la integración de tecnologías avanzadas en el proceso de producción, con un enfoque en la reducción de costos y mejora de la eficiencia. Esto implica el apoyo a la modernización de instalaciones existentes y la adopción de nuevas tecnologías emergentes para mantener la competitividad del sector a nivel global.

Subraya la importancia de generar un entorno regulatorio favorable que facilite la inversión y el desarrollo del hidrógeno verde. Esto incluye la creación de marcos normativos claros y flexibles que se adapten a los cambios tecnológicos y a las necesidades del mercado.

4.6. Dónde está Chile respecto a la industria internacional

La industria del hidrógeno verde en Chile está emergiendo como una fuerza significativa en el contexto global. Gracias a una combinación de recursos naturales abundantes, políticas ambiciosas y un creciente desarrollo de infraestructura el país se encuentra en una posición destacada. Sin embargo, para entender mejor su situación, es útil compararla con la de otros países líderes en esta tecnología emergente como lo son Alemania, Japón, Australia, Corea del Sur, Países Bajos, Reino Unido y China, por lo que se repasarán los siguientes puntos:

- **Recursos Naturales y Potencial de Producción:** Chile goza de una ventaja considerable en la producción de hidrógeno verde debido a sus abundantes recursos de energía solar y eólica. Las condiciones en el desierto de Atacama y en la Patagonia son especialmente favorables para la generación de electricidad renovable, esencial para la producción de hidrógeno verde mediante la electrólisis. Esto le da al país una ventaja en términos de costos de energía frente a países como Alemania y Japón, que también están invirtiendo fuertemente en esta tecnología, pero enfrentan mayores costos en la electricidad.
- **Políticas y Estrategias Nacionales:** Chile ha desarrollado una estrategia clara para el hidrógeno verde, con objetivos ambiciosos como convertirse en el mayor exportador mundial de esta energía para 2030. La estrategia incluye incentivos para la inversión en infraestructura y asociaciones público-privadas.

En comparación, países como Australia también están implementando estrategias agresivas, con el objetivo de liderar en la exportación de hidrógeno verde. Aunque ambos países tienen ventajas, Chile y Australia presentan fortalezas complementarias en recursos y ubicación.

- **Desarrollo de Infraestructura:** La infraestructura para la producción, almacenamiento y transporte de hidrógeno verde en Chile está en pleno desarrollo. El país ha lanzado proyectos importantes, como plantas de producción a gran escala y corredores de exportación. A pesar de estos avances, aún enfrenta desafíos en la construcción de una infraestructura robusta. Por otro lado, países como los Países Bajos y Corea del Sur ya tienen redes de distribución y sistemas de almacenamiento bien establecidos, lo que les da una ventaja en términos de infraestructura.
- **Innovación y Tecnología:** Chile está invirtiendo en investigación y desarrollo para mejorar la eficiencia en la producción de hidrógeno verde. Sin embargo, todavía está en proceso de alcanzar a líderes como Japón, que ya ha implementado tecnologías avanzadas y tiene una infraestructura consolidada para el hidrógeno. Japón, en particular, ha sido pionero en la tecnología de pilas de combustible y en vehículos a hidrógeno, lo que le otorga una ventaja competitiva en aplicaciones comerciales.
- **Mercados y Exportación:** Chile está bien posicionado para aprovechar la creciente demanda global de hidrógeno verde, especialmente en mercados europeos y asiáticos. La proximidad geográfica y los acuerdos comerciales con países como Alemania y Japón ofrecen oportunidades importantes para la exportación. No obstante, la competencia global es intensa, con países como Qatar y Australia también posicionándose como proveedores clave. La capacidad de Chile para mantenerse competitivo dependerá de su habilidad para reducir costos y aumentar rápidamente su capacidad de producción.

En resumen, Chile está en una posición prometedora en el sector del hidrógeno verde, considerada entre las principales potencias, gracias a sus recursos naturales y a políticas favorables. Sin embargo, aún enfrenta desafíos en infraestructura y tecnología que deberá superar para consolidar su liderazgo en el mercado global. Mientras países como Alemania, Japón y Australia continúan avanzando en

tecnología y en infraestructura, Chile debe seguir invirtiendo y desarrollando su capacidad para mantenerse competitivo en este emergente sector. (International Energy Agency, 2023)

4.7. Colaboraciones y Asociaciones Estratégicas

4.7.1. Cooperación Internacional

Chile ha establecido importantes alianzas con países líderes en la producción de hidrógeno verde:

- **Francia:** En septiembre de 2024, Chile y Francia firmaron una declaración conjunta para cooperar en la formación técnica y profesional en el sector del hidrógeno. Este acuerdo busca fortalecer la capacidad de Chile en la producción de hidrógeno verde mediante el intercambio de conocimientos y experiencias. Empresas como Engie están participando en proyectos en Chile, apoyando la transición energética. (Ministerio de Energía, 2024)
- **Alemania:** En un significativo paso hacia la cooperación energética, Chile firmó un Memorándum de Entendimiento con el Puerto de Hamburgo, el más grande de Alemania, para facilitar la exportación de hidrógeno verde. Este acuerdo, que involucra a altos funcionarios como el ministro de energía chileno, Claudio Huepe, y el alcalde de Hamburgo, Dr. Peter Tschentscher, posiciona a Chile como un potencial líder en la producción de energías renovables, con la ambición de convertirse en el exportador más competitivo para 2030. La asociación permitirá no solo satisfacer la demanda interna de hidrógeno, sino también crear un flujo sostenido hacia otros mercados globales, destacando el papel estratégico del puerto en la distribución de este recurso en Europa central y occidental. (Ministerio de Relaciones Exteriores, 2023)

En paralelo, Chile y Alemania han acordado crear un grupo de trabajo en el marco de la Asociación Chileno-Alemana de Energía para identificar proyectos viables en el ámbito del hidrógeno verde. Este grupo, que se reunirá periódicamente durante un año, tiene como objetivo facilitar el desarrollo de cadenas de suministro, compartir mejores prácticas y establecer sistemas de certificación de emisiones bajas de carbono. El ministro de energía chileno, Juan Carlos Jobet, y su homólogo alemán, Peter Altmaier, subrayaron la

importancia del hidrógeno verde para alcanzar la carbono neutralidad para 2050. Esta iniciativa se alinea con el programa H2GGlobal de Alemania, que busca nuevas rutas comerciales para importar hidrógeno verde, consolidando así una alianza robusta entre ambos países en la lucha contra el cambio climático. (Minsiterio de Relaciones Exteriores, 2019)

- **Países Bajos:** Chile ha recibido apoyo de los Países Bajos, que son pioneros en la tecnología de hidrógeno. Se han realizado intercambios técnicos y se han explorado posibilidades de inversión a través de empresas como Shell, que está evaluando proyectos en el país. (Ministerio de Relaciones Exteriores, 2023)

Y estas son solo algunos de las alianzas llevadas a cabo, ya que, hoy en día Chile también cuenta con acuerdos de colaboración con: Singapur, Reino Unido, Japón, Corea, Estados Unidos y con los siguientes puertos: Puerto de Rotterdam, Amberes y Zeerbrugge, Puerto de Hamburgo.

4.7.2. Alianzas Público-Privadas

Las asociaciones entre el sector público y privado son fundamentales para el crecimiento de la industria del hidrógeno verde:

- **Colbún y H2 Chile:** Colbún, una de las principales generadoras de energía en el país, ha manifestado su interés en desarrollar proyectos de hidrógeno verde. En colaboración con H2 Chile, la asociación gremial del hidrógeno en el país, se están promoviendo políticas y proyectos que impulsan la producción y uso de hidrógeno. (H2 Chile, 2020)

Chile a la vez cuenta con colaboraciones con instituciones internacionales como Maersk Mc-Kinney Moller Center for Zero Carbon Shipping, Team Europe, Banco Europeo de Inversiones y Japan Bank for International Cooperation.

4.7.3. Colaboración con Universidades e Instituciones de Investigación

La academia chilena está desempeñando un rol crucial en la investigación y desarrollo del hidrógeno verde, es por esto que la Subsecretaría de Energía de Chile ha firmado un convenio con 22 instituciones, que incluye la participación de 19 universidades, para establecer el Centro Nacional de Soluciones Energéticas Descentralizadas Avanzadas (SEDA). Este centro se propone impulsar la

colaboración, investigación y desarrollo en energías renovables y la emergente industria del hidrógeno verde en todo el país. La actividad de lanzamiento tuvo lugar en la Universidad Austral de Chile, donde se delinearon los objetivos principales del centro y se presentó el equipo de trabajo encargado de llevar a cabo sus iniciativas.

El convenio, que cuenta con una inversión de 250 millones de pesos, reúne a un amplio espectro de universidades, incluyendo la Universidad de Magallanes, Universidad de Aysén, Universidad de Los Lagos, Universidad de La Frontera, Universidad de Concepción, Universidad del Biobío, Universidad de Talca, Universidad de O'Higgins, Pontificia Universidad Católica de Chile, Universidad Adolfo Ibáñez, Universidad de Chile, Universidad Técnica Federico Santa María, Universidad de La Serena, Universidad de Atacama, Universidad de Antofagasta, Universidad Católica del Norte, Universidad Arturo Prat y Universidad de Tarapacá. Junto con estas, también participan la Fundación Fraunhofer, la Fundación Parque Carén y EBP Chile.

Luis Felipe Ramos, subsecretario de Energía, resaltó la importancia de esta iniciativa en el marco de la Agenda de Energía 2022-2026, que busca convertir la energía en un motor de crecimiento económico y desarrollo sostenible. En este contexto, enfatizó que la innovación será clave para avanzar en la transición energética, priorizando la producción y uso de hidrógeno verde, así como la promoción de la electromovilidad y la eficiencia energética.

Además de la firma del convenio, el subsecretario realizó una inspección en Valdivia para garantizar la seguridad en torno a las líneas eléctricas. Subrayó la necesidad de mantener despejadas las franjas de seguridad para asegurar un suministro eléctrico continuo y seguro. Las autoridades hicieron un llamado a la comunidad a colaborar en el mantenimiento de la vegetación cercana a las líneas eléctricas y a reportar cualquier situación que pudiera interrumpir el servicio, garantizando así la calidad energética para todos los chilenos. (Ministerio de Energía, 2023)

4.7.4. Participación en Redes Internacionales

Chile ha integrado diversas redes y consorcios internacionales que promueven el hidrógeno verde:

- **Foro Internacional del Hidrógeno:** La participación de Chile en foros como este proporciona una plataforma para establecer contactos con actores globales y fomentar la inversión en proyectos de hidrógeno. (Ministerio de Relaciones Exteriores, 2023)

4.8. Aplicaciones del hidrógeno verde

Uno de los usos principales del hidrógeno es la elaboración de amoníaco, este es un compuesto químico esencial en la industria, utilizado principalmente para la producción de fertilizantes y productos químicos. Tradicionalmente, el amoníaco se obtiene a partir del gas natural, un proceso que resulta en la emisión de dos toneladas de CO₂ por cada tonelada de amoníaco producido. Este tipo de amoníaco, conocido como "gris", representa la mayor parte de la producción global, que alcanza alrededor de 185 millones de toneladas anuales. Sin embargo, la creciente preocupación por el cambio climático ha impulsado la búsqueda de alternativas más sostenibles, como el amoníaco verde, que se elabora sin emisiones de carbono.

El amoníaco verde se produce a partir de fuentes de energía renovable, lo que lo convierte en una opción respetuosa con el medio ambiente. Su fabricación comienza con la obtención de hidrógeno verde. Este hidrógeno se combina posteriormente con nitrógeno atmosférico en un proceso conocido como síntesis de Haber-Bosch, donde se producen reacciones a alta presión y temperatura, generando amoníaco sin las emisiones nocivas asociadas a su producción convencional.

Este se emplea en la agricultura como fertilizante, ya que proporciona nitrógeno, un nutriente vital para las plantas. Además, su versatilidad lo hace adecuado para la producción de una amplia gama de productos químicos, incluyendo ácido nítrico, fibras sintéticas y productos farmacéuticos. Con el auge del amoníaco verde, también se están explorando nuevos usos, como su aplicación como vector energético, que permite el transporte y almacenamiento de hidrógeno de manera eficiente.

Un uso importante de este a nivel nacional es en la minería, ya que, una de sus aplicaciones más relevantes es en la producción de explosivos, ya que el amoníaco es un componente esencial en la fabricación de nitrato de amonio, un explosivo ampliamente utilizado en la extracción de minerales. Además, el amoníaco se puede utilizar en sistemas de refrigeración y en el funcionamiento de maquinaria

pesada, contribuyendo a la eficiencia operativa y a la reducción de emisiones de carbono en el sector.

Otro aspecto interesante del amoníaco verde es su potencial como combustible, especialmente en el sector marítimo. Al ser considerado un combustible limpio, podría jugar un papel clave en la descarbonización de este sector. Además, se está investigando su uso en calderas y turbinas para la generación de calor y electricidad, contribuyendo así a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Volviendo al hidrógeno como tal, en el ámbito del transporte este se utiliza a través de celdas de combustible, permitiendo el uso de vehículos eléctricos de hidrógeno, como automóviles, autobuses y camiones. Además, también se puede aplicar en el transporte marítimo y ferroviario, actuando como combustible para buques y trenes, lo que contribuye a la reducción de emisiones de carbono en estos sectores. Un ejemplo de esto es la primera locomotora propulsada con hidrógeno en Chile y Sudamérica la cual forma parte del Ferrocarril Antofagasta Bolivia (FCAB) y realizará labores de transporte de carga minera. (Ibarra, 2024)

En términos de calefacción, el hidrógeno puede ser utilizado en edificios y procesos industriales, reemplazando combustibles fósiles en calderas y sistemas de calefacción, lo que contribuye a la reducción de emisiones en el sector residencial e industrial.

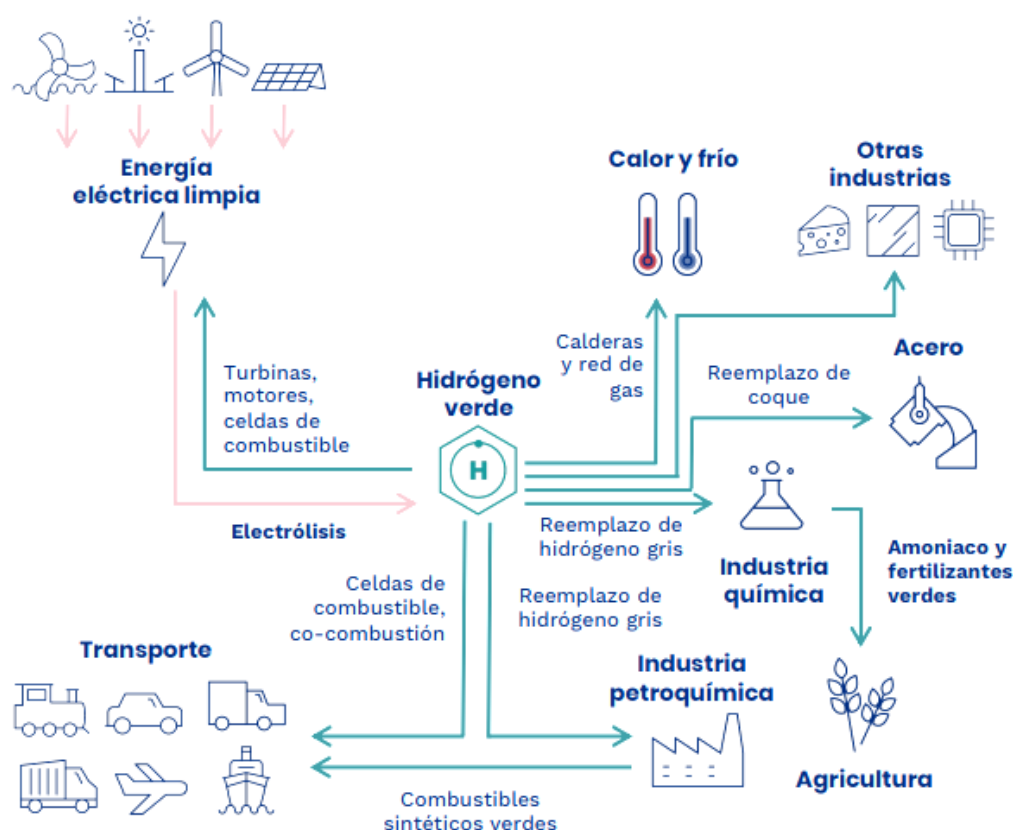
El hidrógeno verde también tiene un papel relevante en la producción de electricidad. A través de celdas de combustible estacionarias, puede proporcionar energía a edificios y comunidades.

En la sustitución de combustibles fósiles, el hidrógeno puede ser utilizado en industrias pesadas, reemplazando el carbón o el gas natural en procesos industriales, como la producción de acero, contribuyendo así a la descarbonización de estos sectores.

Por último, en el campo de la química, el hidrógeno verde puede ser empleado en la producción de metanol y otros compuestos químicos, que son insumos importantes en la fabricación de plásticos y productos químicos.

Figura 4:

Potencial de descarbonización del hidrógeno verde



(Adaptado de Siemens, Power-to-X, 2020)

5. METODOLOGÍA

En la presente investigación, se adoptará un enfoque documental. Este enfoque es adecuado dado que la principal intención es recopilar y analizar información existente para ofrecer una guía general que resuma el panorama nacional en esta emergente industria. A través del análisis de diversas fuentes documentales, se buscará proporcionar un entendimiento integral de los aspectos más relevantes del hidrógeno verde en el contexto chileno.

El análisis de datos se centrará, como se menciona anteriormente, en un enfoque documentado, donde se identificarán y categorizarán temas recurrentes, así como los desafíos y oportunidades presentes en la industria del hidrógeno verde en Chile. Además, se llevará a cabo una comparación con la situación de otros países

que están desarrollando esta industria, lo que permitirá contextualizar la realidad chilena en un marco global.

El diseño de la investigación será descriptivo, orientado a ofrecer una visión clara y detallada sobre el estado actual del hidrógeno verde en Chile. Esto incluye la identificación de políticas públicas, proyectos en desarrollo, tecnologías empleadas y perspectivas futuras. El estudio no se centrará en la recolección de datos primarios, sino que se apoyará en una revisión exhaustiva de la literatura y documentos relevantes que ya existen en el ámbito académico y de la industria.

La metodología de recolección de información se basará en una revisión bibliográfica. Se llevará a cabo un análisis de literatura académica, informes gubernamentales, documentos de organismos internacionales y publicaciones respecto a la industria del hidrógeno verde. Esta revisión buscará identificar estudios previos que aborden el tema y resalten los desafíos y oportunidades presentes en el ámbito nacional.

En cuanto a las fuentes de información, se establecerán criterios claros para seleccionar documentos relevantes. La "población" de estudio será, en este caso, todas las fuentes documentales que aporten información valiosa sobre el hidrógeno verde en Chile. Se seleccionarán intencionadamente aquellos documentos que sean más representativos y que cuenten con datos actualizados sobre la materia.

Los procedimientos para llevar a cabo esta metodología comenzarán con la definición de criterios de inclusión que aseguren la relevancia y actualidad de la información recolectada donde se asegurará que toda la información utilizada sea citada adecuadamente, respetando derechos de autor y evitando el plagio. Con esta metodología, se espera ofrecer un análisis riguroso y sistemático que contribuya a un mejor entendimiento del panorama del hidrógeno verde en Chile.

6. ANÁLISIS PESTEL

6.1. Político

6.1.1. Políticas Gubernamentales y Regulaciones

- **Lanzar e implementar el plan de trabajo de regulaciones habilitantes para la industria del hidrógeno y derivados:** Este plan regulatorio se enfoca en

establecer normas relacionadas con la infraestructura de hidrógeno, su transporte, aplicaciones, calidad y comercialización, entre otros aspectos. Inicialmente, se desarrollarán regulaciones que aborden la seguridad en las instalaciones, el funcionamiento de estaciones de carga de combustible, las especificaciones de calidad del hidrógeno y los distintos modos de transporte de cargas. Además, se contempla una revisión del plan cada tres años para adaptarlo a la evolución y maduración de la industria. (Gobierno de Chile, 2023)

- **Impulsar regulación específica y habilitante para la desalinización de agua de mar:** Se busca promover el uso de agua desalada y/o reúso de agua para actividades como el uso industrial, contribuyendo así al resguardo y priorización del uso de fuentes de agua continentales para el consumo humano. (Gobierno de Chile, 2023)
- **Impulsar la reforma integral de permisos sectoriales:** Busca mejorar la estandarización, eficiencia, proporcionalidad, previsibilidad e institucionalidad de los permisos para inversiones, apuntando a reducir en un 30% los plazos para la autorización de proyectos. (Gobierno de Chile, 2023)

6.1.2. Incentivos y Subsidios

En Chile, la industria del hidrógeno verde (H2V) no cuenta con un régimen fiscal específico. La comercialización de este tipo de hidrógeno está sujeta al Impuesto a la Renta de Primera Categoría y al IVA, aunque las exportaciones están exentas de este último. Además, la actividad está sujeta a la patente comercial o industrial y a la Contribución de Desarrollo Regional, dependiendo del monto de la inversión y las posibles exenciones aplicables. No se aplica el Impuesto Específico a los Combustibles al hidrógeno verde.

En cuanto a incentivos fiscales, los más destacados incluyen: a) Incentivos para Investigación y Desarrollo, que ofrecen un crédito tributario del 35% sobre los gastos, con un límite anual de 15.000 UTM, y un gasto tributario adicional del 65%; y b) Exención de IVA para importaciones de bienes de capital destinados al desarrollo, exploración o explotación de proyectos de energía en Chile, siempre que la inversión supere los cinco millones de dólares estadounidenses.

Además, existen desincentivos a la competencia, como los impuestos verdes, y se estima que un incremento en los impuestos sobre el diésel y las emisiones contaminantes podría promover el uso del hidrógeno verde. (Herrera, 2023)

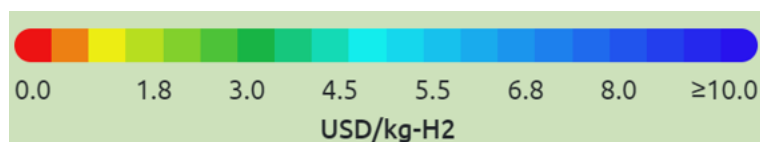
Además, existen los siguientes incentivos:

- **Facility Corfo:** A través de Corfo se habilitará una facilidad financiera (facility, por su nombre en inglés) que permita disminuir el riesgo financiero de los proyectos que cumplan con requisitos medioambientales y sociales. Permitirá financiar proyectos de H2V en distintas etapas de desarrollo. El facility tendrá un tamaño inicial de US\$1.000 millones, en gran parte financiado por bancos de desarrollo (BID, Banco Mundial, KfW y BEI), y el resto con recursos propios de Corfo. (Ministerio de Energía de Chile, 2023)
- **Tasa de desarrollo para inversión:** Se reducirá el impuesto de primera categoría a 25% y se establecerá un impuesto de 2% a las empresas en el régimen general de tributación que podrá deducirse mediante inversiones que incrementen la productividad de las empresas, como adquisición de equipamiento de alta tecnología. (Ministerio de Energía de Chile, 2023)

6.2. Económico

6.2.1. Costos de Producción

Actualmente existe una herramienta en la web llamada “explorador de costo nivelado de hidrógeno verde” la cual fue desarrollada por el Ministerio de Energía en la página web “explorador de hidrógeno verde” y su finalidad es mostrar los costos actuales y proyectados de esta industria. Estos están separados por región y se permite ingresar filtros por año (2022, 2030, 2040, 2050) o por si se ocupará energía eólica o térmica para el proceso. Se utiliza un sistema de color en el mapa nacional para indicar los costos (USD/kg-H₂), como indica el siguiente cuadro:

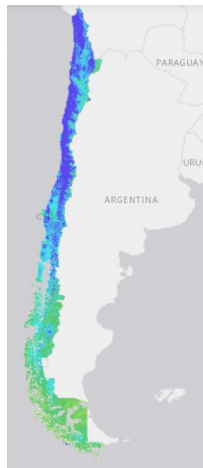


(Ministerio de Energía, 2024)

Cabe recordar que estos costos son una estimación generada por el ministerio de energía en colaboración con el Centro de Energía, la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, la Universidad de Santiago de Chile y la Pontificia Universidad Católica de Chile. A continuación, se detallan los costos por año separados en energía eólica y térmica.

Solo energía eólica: Se focalizará en zona austral de Chile.

- 2022: 3,15 USD/kg-H₂ en el mejor de los casos, entre 3,5-4,5 USD/kg-H₂ en general.



- 2030: 2 USD/kg-H₂ en el punto óptimo, luego nos movemos entre 2,5-3,5 USD/kg-H₂ en general



- 2040: Se podría llegar a 1,8 USD/kg-H₂ en el mejor de los casos y el resto rondaría entre 2-2,5 USD/kg-H₂.



- 2050: En el escenario más optimista se llegaría a los 1,5 USD/kg-H₂ mientras que en general se rondaría entre este valor y 2 USD/kg-H₂.



Solo energía solar: Se focalizará en zona del norte grande de Chile.

- 2022: En el mejor punto estaría llegando a los 4 USD/kg-H₂ mientras que en general varía entre 4,1-5 USD/kg-H₂.



- 2030: La zona más favorable marca aproximadamente 2,7 USD/kg-H₂. Para el resto de la zona los costos se encuentran entre 2,8-3,5 USD/kg-H₂.



- 2040: El costo más bajo es de 2,2 USD/kg-H₂ mientras que el costo promedio ronda entre este valor mencionado y 2,5 USD/kg-H₂.



- 2050: El mejor costo encontrado para esta fecha debería ser de 1,75 USD/kg-H₂ para luego pasar a un rango de entre 1,8-2,2 USD/kg-H₂.



6.2.2. Inversiones y Financiación

La agencia de desarrollo chilena CORFO ha seleccionado seis proyectos de hidrógeno con una capacidad acumulada de electrolizadores de 396 MW, los cuales serán financiados por subsidios públicos que totalizan 50 millones de dólares. Las empresas son Enel Green Power (16.9 millones de dólares para 240 MW de capacidad de electrolizadores), Air Liquide (11.7 millones de dólares para 80 MW), Engie (9.5 millones de dólares para 26 MW), GNL Quintero (5.7 millones de dólares para 10 MW), CAP (3.6 millones de dólares para 20 MW), y Linde (2.4 millones de dólares para 20 MW). (GH2, 2024)

A modo de incentivar el crecimiento de la industria, la Comisión de Hacienda aprobó en 2023 un fondo especial, introduciendo así un nuevo incentivo tributario para fomentar la inversión, el cual ofrece créditos aplicables al impuesto de primera categoría para proyectos enfocados en la inversión en capital fijo. Este incentivo está diseñado para generar un impacto económico positivo, promoviendo el desarrollo y la transferencia de tecnología, así como la descarbonización de la matriz productiva. Para el primer año, se ha asignado un presupuesto inicial de 500 millones de dólares, destinado a proyectos que comiencen o que hayan iniciado desde noviembre de 2022. La implementación de este fondo especial está prevista para este año, y a partir de 2024, el monto anual disponible en créditos se determinará en la Ley de Presupuestos.

Para optar a este crédito, los proyectos deberán cumplir con las condiciones establecidas por la ley. Estos requisitos incluyen ser contribuyentes del impuesto de primera categoría y someterse a un proceso de calificación ambiental. Además, los solicitantes no podrán pedir un crédito superior al 10% del monto total disponible para ese año. La selección de los proyectos se realizará de manera competitiva y objetiva, basada en la asignación de puntajes según cuatro criterios principales:

1. **Inversión apalancada:** Se refiere a la proporción entre el crédito solicitado y la inversión comprometida por el contribuyente.
2. **Efecto multiplicador:** Se evaluará el impacto económico del proyecto, utilizando la matriz insumo-producto publicada por el Banco Central.
3. **Potencial de descarbonización:** Se analizará cómo el proyecto contribuye a la reducción de la huella de carbono en la matriz energética.
4. **Capacidad tecnológica:** Se considerará el potencial del proyecto para absorber, adaptar y desarrollar nuevas tecnologías.

En paralelo, el Comité CORFO para el H2V desarrolló para 2024 el **Facility CORFO H2V**, programa financiero que crea un fondo de 1000MMUSD para la generación de instrumentos orientados a evitar riesgos, disminuir costos y entregar señales positivas que aceleren las inversiones para la industria del hidrógeno verde en Chile. Este programa contiene los siguientes instrumentos financieros: (Gobierno de Chile, 2024)

- **Créditos concesionales:** Transferir la concesión de los préstamos de la Banca del desarrollo que financian la Facilidad Corfo H2V, con bajas tasas de interés. Otorgar “capital paciente”, con alta flexibilidad en sus estructuras y condiciones originales y contando con mecanismos que permitan renegociaciones y/o reprogramaciones en casos en que sea necesario hacerlo.
- **Instrumentos para evitar riesgos:** Garantías parciales de crédito para mitigar el riesgo financiero global de los proyectos de H2V. Líneas de crédito para cuentas de reserva para el pago de la deuda, con el fin de mitigar el riesgo de pago de la deuda privada movilizadora hacia los proyectos de H2V. Líneas de crédito para cuentas de liquidez, para mitigar el riesgo asociado al desempeño técnico de los subproyectos de H2V.

Además, se cuenta con otros programas/iniciativas para financiar a los cuales la industria de hidrógeno verde califica como aplicable, los cuales son los siguientes:

- **Innova Alta Tecnología:** Apoya innovaciones intensivas en I+D, que enfrenten alta incertidumbre tecnológica y que apunten a escalamientos de alto potencial de comercialización nacional o global, fortaleciendo las capacidades de I+D+i en las empresas. **Monto: 678 MUSD por proyecto.**
- **Crea y Valida:** Apoya el desarrollo de nuevos o mejorados productos (bienes o servicios) y/o procesos, que requieran I+D, desde la fase de prototipo, hasta la fase de validación técnica a escala productiva y/o validación comercial. **Monto: 204 MUSD – 249 MUSD por proyecto.**
- **Ley I+D:** Entrega beneficio tributario de hasta un 35% de Crédito tributario contra el Impuesto de Primera Categoría sobre el monto invertido en I+D y el 65% restante del monto invertido podrá ser considerado como gasto necesario para producir la renta, independiente del giro de la empresa. **Monto: 1 MUSD por proyecto.**
- **Capital Humano Experto:** Busca contribuir al fortalecimiento de capacidades en I+D+i en las empresas nacionales, a través de la inserción de profesionales y técnicos/as de nivel superior, altamente calificados, para su participación en

el desarrollo de desafíos de I+D+i, con la finalidad de aumentar la productividad y competitividad de dichas empresas. **Monto: 45 MUSD.**

- **Viraliza:** Busca convocar entidades que realicen programas de traspaso de conocimientos, habilidades, herramientas cultura de emprendimiento e innovación. **Monto: 32 MUSD.**
- **Crédito Verde:** Programa de financiamiento, a través de instituciones financieras participantes, para potenciar el desarrollo y ejecución de proyectos que mitiguen los efectos del cambio climático y/o mejoren la sustentabilidad. **Monto: 20 MMUSD**

(Gobierno de Chile, 2024)

6.2.3. Impacto en el Empleo y Crecimiento Económico

En cuanto al empleo, se estima dentro de la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde que para el año 2030 se generen cerca de 22.000 nuevos empleos relacionados con esta industria mientras que al año 2050 se esperan aproximadamente 91.000. Lo siguiente contribuiría al crecimiento del PIB, dado que, los salarios de estos nuevos empleos aumentan el ingreso disponible de las familias, lo que puede impulsar el consumo en otros sectores de la economía, como bienes y servicios. (Generadoras de Chile, 2021)

Mientras que, en la arista del crecimiento económico a través de exportación, se estima un ingreso de \$3.000 millones USD/año para el 2030 y de 24.000 millones USD/año para el 2050, cantidades que se sumarían directamente al PIB. Para el 2023 el PIB nacional fue de 332,845 millones de dólares, por lo que si llevamos estos ingresos a una representación del PIB actual se trataría de alrededor de un 0.90% y 7.20% respectivamente. (Generadoras de Chile, 2021)

Otro punto importante para considerar es el tamaño del mercado interno chileno para esta industria, donde se espera que para el año 2030 se muevan cerca de \$2.000 millones USD/año, mientras que, para el 2050 se calculan \$9.000 millones USD/año. (Generadoras de Chile, 2021)

6.3. Social

6.3.1. Impacto en Comunidades Locales

En el caso de las regiones donde se están llevando a cabo proyectos de hidrógeno verde se puede impulsar la economía local mediante inversiones en infraestructura, servicios y proveedores locales. Esto puede conducir a un aumento en la actividad económica y en la recaudación de impuestos, así como una estimulación a la inversión en la región.

6.3.2. Equidad de género

En el Plan de Acción de H2V 2023-2030, sus principales ámbitos de acción en cuanto a equidad de género son:

1. Fortalecer la autonomía económica de las mujeres fomentando su participación en el desarrollo de la industria de H2V.
2. Incentivar y promover la participación y liderazgo de mujeres en procesos de toma de decisiones y en espacios de generación y transferencia de conocimiento.
3. Impulsar y proporcionar lineamientos, estándares de seguridad y calidad de vida con enfoque de género en los territorios. (Ministerio de Energía de Chile, 2023)

6.3.3. Educación y Capacitación

Al tratarse de una industria tan nueva, es necesario contar con personas capacitadas para el buen desarrollo de esta, hay que contar con la calificación necesaria para cada eslabón del proceso productivo.

Se desarrollarán capacidades ajustadas a las necesidades actuales y futuras de la industria del hidrógeno verde y sectores relacionados, con el objetivo de cerrar las brechas identificadas y fortalecer la mano de obra calificada. Esto se logrará a través de programas de capacitación y entrenamiento en diversos niveles educativos.

A corto plazo, se ofrecerán conocimientos especializados a personas interesadas en ingresar a esta industria, especialmente aquellas con experiencia previa en el manejo de combustibles o sustancias químicas, ya que son las más adecuadas para satisfacer las demandas de los primeros proyectos. Simultáneamente, se actualizarán los currículos en distintos niveles educativos —

educación media, técnica, y superior— para incluir contenidos relevantes sobre el hidrógeno verde. También se ofrecerán programas de formación para aquellos sin experiencia previa en esta área, garantizando así una preparación integral para todos los interesados.

Paralelamente se implementarán programas de capacitación y entrenamiento enfocados en las áreas de operación, mantenimiento, seguridad y prevención de riesgos, entre otros temas relevantes para las instalaciones involucradas en la producción, transporte, almacenamiento y uso del hidrógeno verde y sus derivados. Estos programas estarán dirigidos a la educación media técnica profesional, con el objetivo de fortalecer el capital humano en las regiones que forman parte de la cadena de valor del hidrógeno verde y sus productos relacionados.

Se espera que para el año 2025, se lleve a cabo un concurso de pasantías al extranjero para trabajadores industriales con formación técnico-profesional, de esta manera se asegurarán de especializarse de la mejor manera en cuanto a hidrógeno verde.

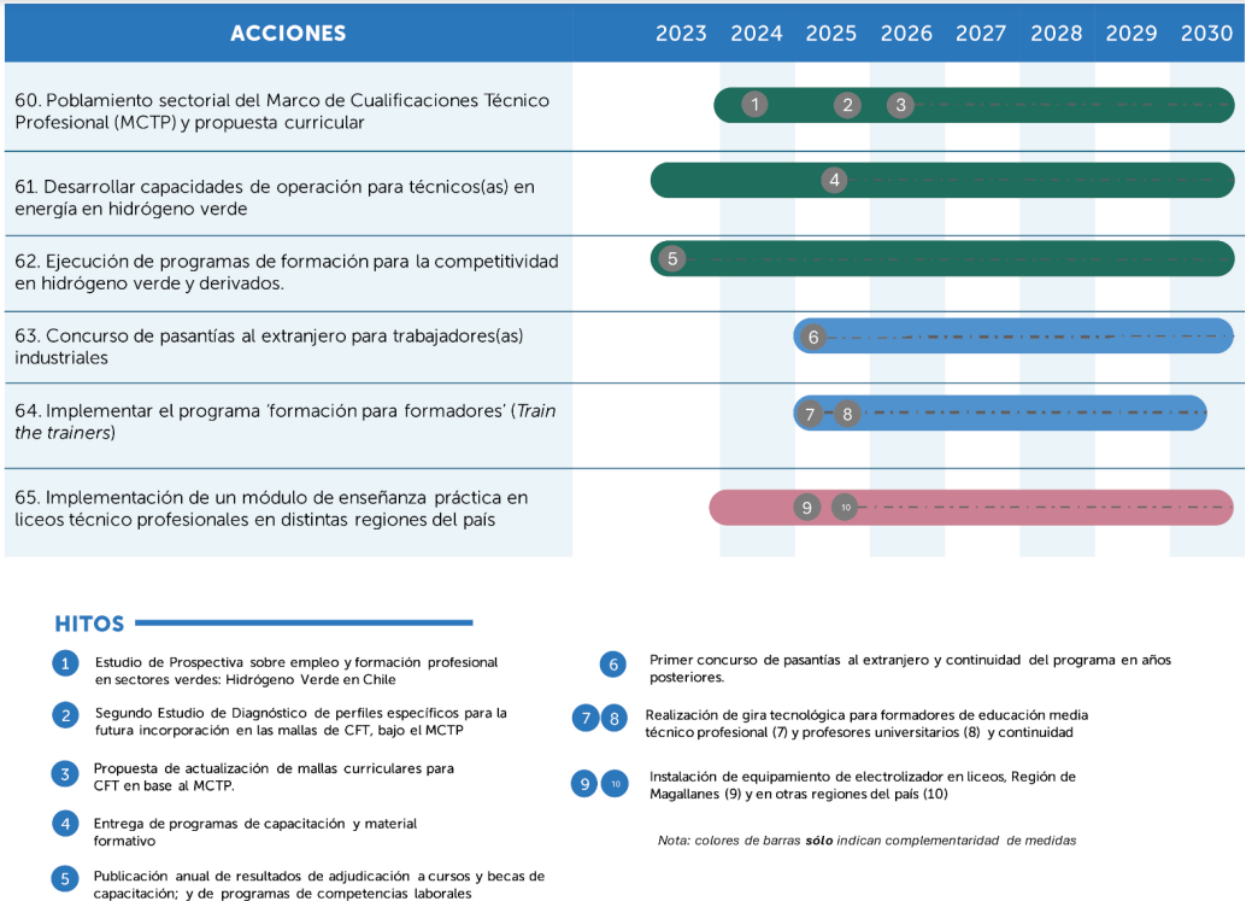
Siguiendo esta línea, con fecha 3 de septiembre de 2024, Chile y Francia firmaron una declaración conjunta para potenciar la formación técnica y profesional en el desarrollo del hidrógeno verde. Este acuerdo fue firmado por el ministro de Energía de Chile, Diego Pardow, y el embajador de Francia en Chile, Cyrille Rogeau, previo a la inauguración de la segunda versión de Hyvolution Chile.

Ambos países consideran el hidrógeno verde y bajo en carbono como fundamentales para alcanzar sus metas de descarbonización y transición energética. La colaboración se enmarca en un grupo de trabajo franco-chileno creado en 2023, que identificó la capacitación como un elemento clave para el crecimiento de esta industria.

El ministro Pardow destacó que esta iniciativa generará oportunidades para los jóvenes chilenos y contribuirá al éxito del sector. Por su parte, el embajador Rogeau subrayó la importancia de formar rápidamente a un gran número de profesionales en Chile, con el compromiso de Francia de apoyar en este proceso. (Ministerio de Energía, 2024)

Para respaldar todo lo mencionado en cuanto a educación, el gobierno lanzó la siguiente línea de acción a seguir para el fortalecimiento y desarrollo de capital humano.

Figura 5:
Fortalecimiento y desarrollo de capital humano



(Gobierno de Chile, 2023)

6.4. Tecnológico

6.4.1. Infraestructura de Almacenamiento y Distribución

El hidrógeno se puede almacenar y transportar en más de una manera y esto dependerá del tipo de tecnología de almacenamiento y sus propiedades físicas.

Cuando se tiene como gas comprimido (CGH_2) se almacena a alta presión en cilindros fabricados con diversos materiales. La presión a la que se puede almacenar el gas depende del tipo de material utilizado en el recipiente. En la actualidad, se utilizan materiales compuestos, como polímeros, fibras y resinas, para fabricar estos tanques, lo que permite aumentar la presión y reducir el tamaño del contenedor para la misma cantidad de gas.

Los tanques de hidrógeno deben diseñarse específicamente para soportar altas presiones y resistir la fatiga, ya que están sujetos a ciclos continuos de carga y descarga. Además, deben enfrentarse a un fenómeno conocido como fragilización por hidrógeno, que implica la permeación del hidrógeno en el metal, lo que disminuye la ductilidad del tanque. Una de las desventajas de este método de almacenamiento es el alto costo energético requerido para comprimir el gas dentro del recipiente. Hasta el momento existe cuatro tipos de recipientes para este uso, más uno que sigue en desarrollo y son los siguientes:

- **Tipo I:** Este tipo está fabricado principalmente de acero, lo que lo convierte en la opción más económica, aunque también la más pesada. Se utiliza comúnmente en aplicaciones estacionarias, como en la industria, y puede almacenar hidrógeno a presiones que oscilan entre 150 y 200 bar.
- **Tipo II:** Consiste en un interior de acero recubierto con una capa de fibras de vidrio o carbono. Esto le permite soportar presiones más altas y reduce significativamente su peso en comparación con el tipo I, aunque su coste es mayor. La presión máxima de almacenamiento varía entre 250 y 300 bar.
- **Tipo III:** Este tanque está hecho con una delgada capa de metal rodeada de un material compuesto de fibra y resina, lo que ayuda a disminuir el peso del contenedor en relación con los tipos anteriores. Sin embargo, su precio también es más alto. Los tanques de aluminio y fibra de vidrio pueden almacenar hidrógeno a aproximadamente 300 bar, mientras que los de aluminio y fibra de carbono pueden soportar hasta 700 bar.
- **Tipo IV:** Es el más costoso, pero ofrece la mejor relación entre peso y capacidad de almacenamiento. Suelen estar revestidos con polietileno de alta densidad y contruidos con un material de fibra de carbono o vidrio. Este tipo

es el más ligero de todos, pero también el más caro, y puede alcanzar presiones de almacenamiento cercanas a los 700 bar.

- **Tipo V:** Este tipo de tanque se encuentra aún en una fase de desarrollo inicial. Está completamente hecho de materiales compuestos sin revestimiento metálico y es hasta un 20 % más ligero que los tanques de Tipo IV. Actualmente, este tanque solo puede manejar hidrógeno a bajas presiones, por lo que se necesita realizar más investigaciones para su viabilidad.

En el caso del hidrógeno líquido (LH_2), este debe ser llevado a temperaturas de -253°C mediante el sistema de Linde-Hampson. La ventaja de este método es que permite ingresar mayor cantidad en los recipientes mientras que su principal desventaja es el alto costo energético relacionado con el proceso de licuefacción y el mantenimiento de temperaturas criogénicas, que puede consumir entre el 30 y el 40 % de la energía total del hidrógeno almacenado. Además, existe el riesgo de evaporación del líquido si se almacena durante períodos prolongados.

Finalmente, existe la opción de almacenarlo y distribuirlo a través de borohidruros, amoníaco (NH_3) y metanol (CH_3OH) o bien por hidruros metálicos donde en ambos casos implica introducir hidrógeno en un compuesto químico que lo retiene. Luego, este proceso puede invertirse, permitiendo liberar el hidrógeno de manera controlada en un procedimiento conocido como absorción y desorción.

Si bien ha habido avances, los sistemas de almacenamiento y distribución actuales aún no han alcanzado un nivel tecnológico adecuado para satisfacer criterios esenciales como bajo costo, tamaño compacto, alta densidad energética, durabilidad y seguridad. Por lo tanto, el principal desafío en la actualidad radica en crear tecnologías que logren cumplir con estas características, sobre todo en el ámbito del transporte. (Arima, 2023)

6.4.2. Investigación y Desarrollo

Los avances en la tecnología de electrólisis están marcando un hito en la producción de hidrógeno verde, con mejoras en la eficiencia y reducción de costos. Se están investigando electrolizadores de membrana de intercambio de protones (PEM) y de óxido sólido (SOE), que prometen un rendimiento superior y mayor durabilidad en la producción de hidrógeno.

Asimismo, la búsqueda de nuevos materiales para catalizadores está ganando atención, con un enfoque en sustitutos de metales preciosos como el platino. Este desarrollo busca no solo reducir costos, sino también aumentar la sostenibilidad de los procesos de producción de hidrógeno.

Además, se están desarrollando tecnologías que permiten la integración del hidrógeno verde en las redes eléctricas existentes. Esto incluye sistemas de gestión de energía que optimizan el uso del hidrógeno como medio de almacenamiento y estabilización de la red, mejorando así la resiliencia energética.

Por último, la aplicación de inteligencia artificial y técnicas de análisis de datos en la producción de hidrógeno está en aumento. Estas herramientas permiten la optimización en tiempo real de los procesos, contribuyendo a una mayor eficiencia operativa y un mejor aprovechamiento de los recursos en la industria del hidrógeno verde. (IRENA, 2024)

6.5. Ecológico

6.5.1. Impacto Ambiental Positivo

El hidrógeno verde se posiciona como una solución transformadora en la transición hacia una economía baja en carbono, destacándose por su capacidad para descarbonizar sectores que históricamente han sido difíciles de abordar, como la industria pesada y el transporte. Al producirse mediante electrólisis con energía proveniente de fuentes renovables como la solar y la eólica, el H₂V permite una reducción significativa en las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo así a los esfuerzos globales de mitigación del cambio climático.

El hidrógeno verde no solo puede transformar la forma en que producimos y consumimos energía, sino que también tiene el potencial de mejorar la calidad del aire y la salud pública al reducir la dependencia de combustibles fósiles contaminantes. Este impacto positivo se traduce en un entorno más limpio y saludable, beneficiando tanto a las comunidades locales como al medio ambiente en su conjunto. (Zachary Hurwitz, 2023)

6.5.2. Uso de Recursos Naturales

En cuanto al uso de recursos naturales, existen preocupaciones ambientales serias. La producción de hidrógeno verde requiere grandes cantidades de agua, lo

que puede agravar la escasez hídrica en regiones ya afectadas por este problema. Además, el uso de tecnologías como la desalinizadora genera salmuera, que puede contaminar cuerpos de agua y afectar la vida acuática. La manipulación y almacenamiento del hidrógeno presentan riesgos de seguridad, como explosiones, que no solo pueden afectar a los trabajadores, sino también a las comunidades cercanas y el entorno ambiental.

Por otro lado, la expansión de las instalaciones para producir H₂V puede conducir a cambios en el uso del suelo, poniendo en riesgo la biodiversidad y los ecosistemas locales. La conversión de tierras agrícolas o hábitats naturales para la instalación de infraestructuras energéticas podría tener efectos adversos en la seguridad alimentaria y en la conservación de especies. Por tanto, es crucial implementar estrategias de gestión ambiental y social que evalúen y mitiguen estos impactos.

6.6. Legal

Es recomendable que las empresas interesadas en proyectos de hidrógeno verde consulten con asesores legales y expertos en regulación para asegurarse de cumplir con todos los requisitos pertinentes, dado que las regulaciones pueden cambiar y tener implicaciones específicas según la naturaleza del proyecto. A continuación, se presentan algunas de las principales leyes y regulaciones a cumplir separadas por categorías:

6.6.1. Regulación Ambiental

Evaluación de Impacto Ambiental (EIA):

Ley: N° 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente.

Requisito: Antes de iniciar cualquier proyecto que pueda tener un impacto ambiental significativo, la empresa debe presentar un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) ante el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA). Esto incluye la evaluación de los efectos potenciales del proyecto sobre el medio ambiente y las medidas para mitigarlos. (Ley N° 19.300 - Biblioteca del Congreso Nacional de Chile)

Resolución de Calificación Ambiental (RCA):

Requisito: Una vez aprobado el EIA, el SEA emite una Resolución de Calificación Ambiental (RCA) que autoriza o niega la ejecución del proyecto en función de su impacto ambiental y las medidas de mitigación propuestas. (Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) – Chile)

Protección y Control de Calidad del Aire:

Ley: N° 20.417.

Requisito: Esta ley establece medidas para la protección de la calidad del aire en Chile. Aunque está más orientada a la reducción de emisiones de contaminantes, puede influir en la evaluación de proyectos de hidrógeno verde al considerar sus impactos ambientales. (Ley N° 20.417 - Biblioteca del Congreso Nacional de Chile)

Regulación de Emisiones y Gestión de Residuos:

Ley: N° 20.920.

Requisito: Ley sobre la Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje, que podría tener implicaciones para la gestión de residuos y subproductos generados en la producción de hidrógeno verde. (Ley N° 20.920 - Biblioteca del Congreso Nacional de Chile)

6.6.2. Regulación Energética

Ley de Energías Renovables No Convencionales (ERNC):

Ley: N° 20.257.

Requisito: Esta ley fomenta el desarrollo de energías renovables no convencionales, como la solar y eólica. Los proyectos de hidrógeno verde deben cumplir con los requisitos de esta ley para obtener permisos y beneficios relacionados con la energía renovable. (Ley N° 20.257 - Biblioteca del Congreso Nacional de Chile)

Regulación de Energía Eléctrica:

Ley: N° 20.936, que establece el Código de Procedimiento Administrativo en materia de energía.

Requisito: Los proyectos que incluyen la generación de electricidad para la producción de hidrógeno verde deben cumplir con las regulaciones establecidas por la Comisión Nacional de Energía (CNE) y el Coordinador Eléctrico Nacional (CEN). (Ley N° 20.936 - Biblioteca del Congreso Nacional de Chile)

Aprovechamiento de Energías Renovables No Convencionales:

Ley: N° 21.118.

Requisito: Esta ley establece medidas para promover el uso de energías renovables no convencionales y puede tener implicaciones para la producción de hidrógeno verde, especialmente en lo que respecta a la integración de estas energías en el sistema eléctrico. (Ley N° 21.118 - Biblioteca del Congreso Nacional de Chile)

Eficiencia Energética:

Ley N° 21.305.

Requisito: Introducida en 2021, esta ley establece un marco para la promoción de la eficiencia energética en Chile. Aunque se centra en la eficiencia, también puede influir en proyectos de hidrógeno verde, especialmente en términos de optimización de procesos energéticos. (Ley N° 21.305 - Biblioteca del Congreso Nacional de Chile)

6.6.3. Regulación de Seguridad y Salud

Regulación de Seguridad Industrial:

Ley: N° 16.744 sobre Accidentes del Trabajo y Enfermedades Profesionales.

Requisito: La empresa debe cumplir con las normativas de seguridad para proteger a los trabajadores y prevenir accidentes. Esto incluye la implementación de protocolos de seguridad y medidas preventivas relacionadas con la producción y manipulación de hidrógeno. (Ley N° 16.744 - Biblioteca del Congreso Nacional de Chile)

Regulación de Manejo de Sustancias Peligrosas:

Ley: N° 20.967 sobre Control de Sustancias Químicas y Biológicas.

Requisito: El hidrógeno, aunque no es tóxico, debe manejarse con precauciones específicas debido a su alta inflamabilidad. La empresa debe cumplir con las regulaciones sobre el manejo y almacenamiento seguro de sustancias peligrosas. (Ley N° 20.967 - Biblioteca del Congreso Nacional de Chile)

6.6.4. Regulación de Transporte y Logística

Normas de Transporte de Hidrógeno

Regulación: Reglamento de Transporte de Materiales Peligrosos.

Requisito: El transporte de hidrógeno verde debe cumplir con las normativas sobre el transporte de materiales peligrosos, asegurando el cumplimiento de los estándares de seguridad para la carga y transporte.

Infraestructura de Almacenamiento:

Regulación: Normativas relacionadas con el almacenamiento de gases a alta presión y criogénicos.

Requisito: Deben seguirse las normas de construcción y operación para instalaciones de almacenamiento de hidrógeno, que incluyen medidas para prevenir fugas y explosiones.

6.6.5. Regulación de Explotación y Permisos Especiales

Permiso de Construcción:

Regulación Local: Permiso de construcción y urbanismo otorgado por las municipalidades correspondientes.

Requisito: La empresa debe obtener los permisos necesarios para la construcción de infraestructuras asociadas con el proyecto. (Información específica debe ser consultada con la municipalidad correspondiente.)

Autorización de Uso de Suelo:

Regulación Local: Planes reguladores y normativas urbanísticas.

Requisito: Asegurarse de que el uso del suelo para la planta de hidrógeno verde cumpla con los planes reguladores locales y otras normativas

urbanísticas. (Información específica debe ser consultada con la municipalidad correspondiente.)

6.6.6. Regulación Económica y Financiera

Incentivos y Subsidios:

Regulación: Leyes y políticas relacionadas con incentivos para energías renovables, como la Ley N° 21.129, que establece incentivos para proyectos de energías renovables.

Requisito: La empresa debe cumplir con los requisitos para acceder a subsidios e incentivos gubernamentales para proyectos de energía renovable y sostenibilidad. (Ley N° 21.129 - Biblioteca del Congreso Nacional de Chile)

Regulación Fiscal:

Regulación: Normas fiscales y tributarias.

Requisito: Cumplir con las obligaciones fiscales y tributarias relacionadas con la inversión y operación del proyecto según el Servicio de Impuestos Internos (SII).

6.6.7. Cumplimiento de Normas Internacionales

Normas Internacionales de Calidad y Seguridad:

Regulación: Normas internacionales como las establecidas por la ISO para la producción, almacenamiento y transporte de hidrógeno.

Requisito: La empresa puede necesitar cumplir con estándares internacionales de la Organización Internacional de Normalización (ISO)) para garantizar la calidad y seguridad del hidrógeno verde producido.

7. ANÁLISIS FODA

7.1. Fortalezas

1. **Recursos naturales abundantes:** Chile se destaca por sus excepcionales recursos renovables, especialmente en las regiones del desierto de Atacama, que posee una de las radiaciones solares más altas del mundo. La combinación de energía solar y eólica permite generar grandes cantidades de

electricidad a un costo cada vez más bajo, lo cual es fundamental para la producción de hidrógeno verde a través de la electrólisis. Esta abundancia de recursos posiciona a Chile como un líder potencial en la producción de hidrógeno verde a nivel global.

2. **Compromisos ambientales:** Chile ha asumido un compromiso claro con la sostenibilidad y la reducción de su huella de carbono, marcando un objetivo de alcanzar la carbono neutralidad para 2050. Este marco regulatorio propicia un entorno favorable para las energías limpias y, en particular, para la industria del hidrógeno verde. Además, las políticas de sostenibilidad están cada vez más integradas en la planificación económica del país, lo que facilita la atracción de inversiones en este sector.
3. **Ubicación geográfica:** La geografía de Chile le otorga una ventaja competitiva en términos de exportación. La proximidad a mercados como Asia y Europa, que están demandando hidrógeno verde para descarbonizar sus economías, abre oportunidades significativas para el país. Proyectos de exportación de hidrógeno, como la posibilidad de desarrollar puertos específicos para este fin, pueden establecer a Chile como un proveedor clave en el mercado internacional.
4. **Políticas de apoyo:** El gobierno chileno ha desarrollado una hoja de ruta para el hidrógeno verde, que incluye incentivos para la investigación y el desarrollo, así como fondos para la implementación de proyectos. Estas políticas están alineadas con las metas de desarrollo sostenible y facilitan la colaboración entre el sector público y privado. La creación de marcos normativos y regulaciones específicas para el hidrógeno verde contribuyen a un clima de confianza para los inversionistas.

7.2. Oportunidades

1. **Potencial exportador:** La transición hacia energías limpias y la necesidad de descarbonizar sectores industriales están impulsando la demanda de hidrógeno verde en todo el mundo. Países como Alemania y Japón han fijado objetivos ambiciosos para integrar hidrógeno en sus economías, lo que crea un mercado en expansión para Chile. Esta tendencia presenta una oportunidad

para que el país no solo produzca hidrógeno para su consumo interno, sino también para la exportación a estos mercados.

2. **Desarrollo de infraestructuras:** La construcción de infraestructura adecuada, como plantas de producción, sistemas de transporte y almacenamiento, es fundamental para el desarrollo de la industria del hidrógeno verde. La inversión en este ámbito no solo fomentaría el crecimiento del sector, sino que también podría generar empleo y estimular el desarrollo regional. Además, una infraestructura bien diseñada podría facilitar la integración del hidrógeno en la matriz energética nacional.
3. **Colaboraciones internacionales:** Chile tiene la oportunidad de establecer alianzas estratégicas con países y empresas que estén a la vanguardia de la tecnología del hidrógeno verde. Colaboraciones en investigación, desarrollo y financiación pueden acelerar el avance de proyectos locales y facilitar el acceso a tecnologías avanzadas. Estas asociaciones también podrían abrir puertas a programas de capacitación que fortalezcan el capital humano en el país.
4. **Innovación tecnológica:** La evolución de tecnologías en la producción y almacenamiento de hidrógeno verde, como la mejora de la eficiencia en electrólisis y el desarrollo de sistemas de almacenamiento más seguros y económicos, ofrece una vía para aumentar la competitividad de Chile en el mercado. Inversiones en investigación y desarrollo en el sector podrían posicionar al país como un líder en innovación dentro de la industria del hidrógeno.

7.3. Debilidades

1. **Costos de producción:** Aunque el costo de producción del hidrógeno verde ha disminuido en los últimos años, sigue siendo más elevado que el del hidrógeno gris, que se obtiene a partir de combustibles fósiles. Esta diferencia de precios puede limitar la competitividad del hidrógeno verde, especialmente en mercados donde el costo es un factor crítico. Además, la necesidad de una infraestructura robusta también representa un desafío adicional en términos de costos iniciales.

2. **Infraestructura para distribuir:** La infraestructura actual para la producción, transporte y almacenamiento de hidrógeno verde en Chile es limitada. Sin una red adecuada, el desarrollo y la distribución del hidrógeno se ven obstaculizados, lo que podría restringir el crecimiento del sector. La inversión en infraestructura es crucial, pero también presenta riesgos financieros y logísticos que deben ser cuidadosamente gestionados.
3. **Dependencia de inversiones:** La industria del hidrógeno verde en Chile depende en gran medida de la inversión tanto pública como privada. En un contexto económico incierto, la disponibilidad de capital puede verse afectada, lo que podría frenar el avance de proyectos. La atracción de inversores, especialmente en una fase inicial de desarrollo, requiere un marco de políticas claro y predecible que minimice los riesgos asociados.
4. **Limitaciones técnicas:** A pesar de los avances en la tecnología del hidrógeno, existen desafíos técnicos en su producción y almacenamiento que aún no se han resuelto completamente. Por ejemplo, el almacenamiento de hidrógeno en forma líquida o gaseosa requiere soluciones innovadoras y seguras. Estas limitaciones pueden dificultar la escalabilidad de la producción y el uso del hidrógeno verde a gran escala.

7.4. Amenazas

1. **Competencia internacional:** La creciente inversión y desarrollo de la industria del hidrógeno verde en otros países, como Alemania, Australia y Japón, representan una amenaza para la competitividad de Chile. La rápida evolución de tecnologías en esos mercados podría dejar atrás a Chile si no se implementan estrategias adecuadas para promover la innovación y la eficiencia en el sector.
2. **Regulaciones cambiantes:** El entorno regulatorio es un factor crítico que puede influir en el desarrollo de la industria. Cambios inesperados en las políticas ambientales, normativas de mercado o incentivos fiscales pueden afectar la viabilidad de proyectos en curso o planificados. La incertidumbre regulatoria puede desincentivar la inversión y dificultar la planificación a largo plazo.

3. **Condiciones climáticas:** La producción de hidrógeno verde a partir de fuentes renovables está sujeta a condiciones climáticas que pueden ser impredecibles. Eventos extremos, como sequías o tormentas, pueden afectar la generación de energía solar y eólica, reduciendo la disponibilidad de electricidad para la producción de hidrógeno. Esto puede impactar tanto la producción interna como la capacidad de exportación.
4. **Percepción pública:** La percepción de la sociedad sobre el hidrógeno verde y su potencial puede influir en la aceptación y adopción de esta tecnología. Si la población no comprende los beneficios o tiene preocupaciones sobre su seguridad y sostenibilidad, podría generar resistencia a su implementación. La educación y la comunicación efectiva sobre el hidrógeno verde son cruciales para ganar la confianza del público y fomentar su uso.

8. ANÁLISIS DEL MERCADO

8.1. Demanda actual y futura de hidrógeno

La demanda global de hidrógeno continuó en aumento durante 2023, alcanzando un récord de más de 97 millones de toneladas por año (Mtpa), lo que representa un incremento del 2.5% en comparación con el año anterior. Este crecimiento ha sido constante a lo largo de varias décadas, excepto en 2020, cuando la pandemia de Covid-19 provocó una desaceleración en la economía. Se prevé que esta tendencia continúe en 2024, con la demanda global acercándose a los 100 Mtpa.

En términos regionales, la distribución de la demanda se mantuvo mayormente estable desde 2022. China volvió a ser el mayor consumidor, con casi un tercio de la demanda global (cerca de 28 Mtpa), más del doble que Estados Unidos, que ocupa el segundo lugar con 13 Mtpa, lo que equivale al 14% del total. En general, la demanda de hidrógeno creció de forma moderada en las principales regiones, a excepción del Medio Oriente, donde el aumento fue notable (más del 6% interanual, impulsado por la refinación y la producción de metanol) e India, que vio un crecimiento superior al 5%, gracias a la demanda en los sectores de refinación y acero.

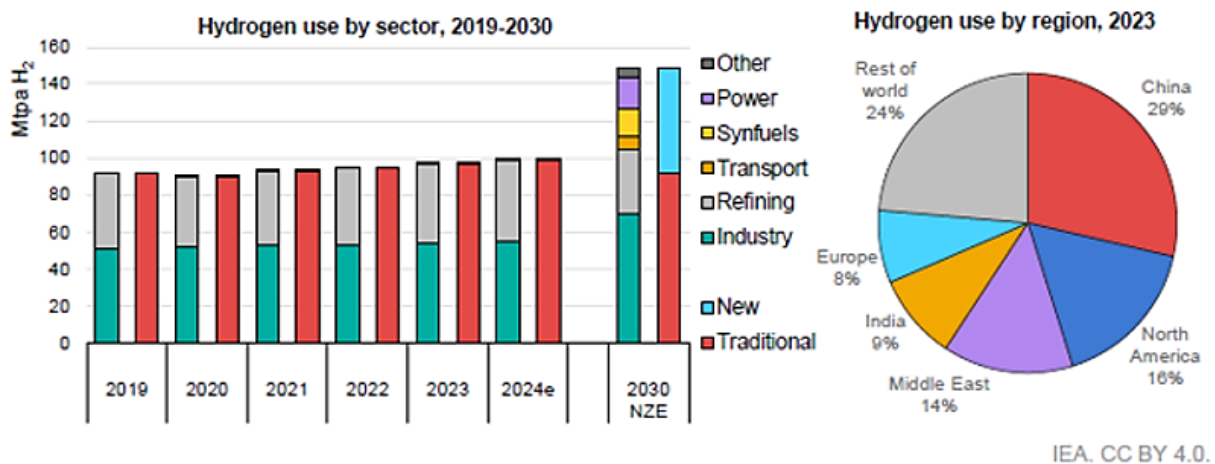
La demanda sigue concentrándose en aplicaciones tradicionales como la refinación, la producción química (amoníaco y metanol) y la fabricación de acero mediante el proceso de hierro reducido directamente (DRI) con gas de síntesis

basado en combustibles fósiles. Esta necesidad se satisface prácticamente en su totalidad con hidrógeno derivado de combustibles fósiles sin tratamiento. Al igual que en años anteriores, el aumento en la demanda global no se debió a políticas de apoyo, sino a tendencias industriales, sin contribuir a la mitigación del cambio climático. De hecho, las emisiones de CO₂ asociadas con la producción y uso de hidrógeno aumentaron a 920 Mtpa, un 1.5% más que en 2022, cifra que equivale a las emisiones anuales combinadas de Indonesia y Francia.

Para lograr un sistema energético de emisiones netas cero, será necesario sustituir la demanda de hidrógeno producido a partir de combustibles fósiles sin tratamiento por hidrógeno de bajas emisiones. Asimismo, su uso debe expandirse a nuevas aplicaciones en sectores donde las emisiones son difíciles de reducir, como la industria pesada, el transporte de larga distancia y la producción de combustibles y electricidad a base de hidrógeno. La adopción de hidrógeno en estas nuevas áreas creció casi un 40% en 2023 en comparación con el año anterior, aunque aún representa menos del 1% de la demanda global (y menos del 0.1% si se excluye la mejora de biocombustibles). En el Escenario de Emisiones Netas Cero para 2050 (Escenario NZE), se estima que la demanda de hidrógeno alcanzará cerca de 150 Mtpa para 2030, de las cuales el 45% será de bajas emisiones. Además, casi el 40% de la demanda global provendrá de nuevas aplicaciones, lo que implica que esta debe crecer más de 80 veces para 2030. El siguiente gráfico nos muestra la demanda histórica y proyectada de hidrógeno a 2030, por sector y región, donde se espera que esta llegue a aproximadamente 150Mtpa.

Figura 6:

Demanda de hidrógeno por sector y región 2019-2030



Notes: NZE = Net Zero Emissions by 2050 Scenario. "Other" includes buildings and biofuels upgrading. 2024e = estimate for 2024. The estimated value for 2024 is a projection based on trends observed until June 2024.

(International Energy Agency, 2024)

Si se hace foco especialmente a la demanda de hidrógeno de bajas emisiones, este experimentó un crecimiento cercano al 10% en 2023 en comparación con el año anterior, aunque sigue siendo muy reducida, representando menos del 1% del total global. Uno de los principales obstáculos para su adopción es su costo, que supera al del hidrógeno producido a partir de combustibles fósiles sin tratamiento. Esta diferencia de precio impide que muchos usuarios existentes opten por el hidrógeno de bajas emisiones y también limita su uso en nuevas aplicaciones donde podría sustituir directamente a los combustibles fósiles. Sin una intervención política que aborde esta brecha de costos o que motive a los actores del mercado a adoptar el hidrógeno de bajas emisiones, la demanda probablemente se mantendrá en un nivel bajo, impulsada solo por iniciativas de empresas con metas de sostenibilidad ambiciosas o por aquellos que buscan experimentar con la tecnología a través de proyectos piloto antes de que se desarrolle un mercado más amplio.

En este contexto, las políticas orientadas a fomentar la demanda están ganando atención, después de varios años en los que los gobiernos se centraron en el lado de la oferta. En el clima político actual, se espera que la demanda de hidrógeno de bajas emisiones pueda multiplicarse por diez para 2030, alcanzando más de 6 Mtpa. Aunque esto representaría un avance considerable en comparación con la

situación actual, aún estaría muy por debajo de los 65 Mtpa requeridos para 2030 en el Escenario de Emisiones Netas Cero (NZE).

En el ámbito privado, ha habido un aumento en el número y la magnitud de los acuerdos de compra entre empresas en los últimos años. Estos acuerdos son esenciales para mitigar el riesgo de inversión en proyectos de producción de hidrógeno de bajas emisiones. En 2023, se firmaron contratos para más de 2 Mtpa de hidrógeno equivalente de bajas emisiones por año, de los cuales casi el 40% son acuerdos firmes. La mayoría de estos acuerdos (35%) se relaciona con proyectos de comercio de hidrógeno que aún no tienen una aplicación final definida, aunque todos están en etapas preliminares. El sector químico es el segundo mayor usuario, representando casi una quinta parte del total acordado, y cerca de la mitad de sus acuerdos son firmes.

Actualmente, el sector químico posee la mayor parte de la compra histórica en acuerdos firmes: de los 1.7 Mtpa que se han registrado desde 2021, casi 0.6 Mtpa provienen de este sector. Destaca el proyecto NEOM, el mayor del mundo en electrólisis, que tiene un contrato de compra para toda su producción con Air Products. Otros proyectos significativos en Canadá e India que recientemente lograron decisiones finales de inversión también cuentan con acuerdos con el sector químico.

Por otro lado, aunque los sectores de refinación y transporte marítimo han acordado cantidades más pequeñas que el químico, su proporción de acuerdos firmes es mayor. Esto indica que las aplicaciones tradicionales de hidrógeno, como la producción de amoníaco, metanol y refinación, están mejor posicionadas para adoptar el hidrógeno de bajas emisiones en el corto plazo, debido a su menor riesgo tecnológico.

También ha habido un número considerable de acuerdos de compra en sectores como el acero, la generación eléctrica y la aviación, con proporciones de acuerdos firmes entre el 20% y el 30%. Sin embargo, en estos sectores, los acuerdos están mucho más concentrados geográficamente. La mayoría de los acuerdos en generación eléctrica provienen de compradores en Japón y Corea, impulsados por iniciativas gubernamentales para descarbonizar el sector mediante el uso de hidrógeno y amoníaco, aunque los proveedores están dispersos por Australia, el Medio Oriente, América del Norte y el sudeste asiático.

En el ámbito del acero, casi todos los acuerdos de compra son entre empresas europeas, que han sido líderes en el desarrollo tecnológico del sector durante muchos años. En cuanto a la aviación, la mayoría de los compradores son también de Europa, con un aumento en esta tendencia tras la implementación de los mandatos de ReFuelEU Aviation en 2023, aunque los proveedores incluyen desarrolladores de proyectos en Europa y América del Norte.

A nivel nacional, la demanda esta principalmente enfocada hacia empresas mineras que están incrementando sus esfuerzos para reducir sus emisiones, por lo que empresas como Anglo American, Antofagasta Minerals, BHP, Collahuasi y Codelco ya han avanzado en sus estrategias de descarbonización por lo que son potenciales clientes de amoniaco producido por hidrógeno de bajas emisiones, el cual puede ser utilizado tanto en explosivos como en maquinaria pesada. (International Energy Agency, 2024)

8.2. Oferta actual y futura de hidrógeno

Como se menciona anteriormente, el suministro de hidrógeno experimentó un incremento del 2.5% en 2023 en comparación con 2022, alcanzando un total de 97 Mtpa de H₂. Esta demanda fue totalmente satisfecha mediante producción local en centros industriales, con un intercambio internacional limitado. China se posiciona como el principal productor, representando, seguido por Estados Unidos y el Medio Oriente y finalmente India. Se prevé que la producción global continúe su trayectoria ascendente para satisfacer la creciente demanda, con proyecciones que indican que podría acercarse a los 100 Mt de H₂ para finales de 2024.

En la actualidad, la producción de hidrógeno se basa predominantemente en combustibles fósiles sin tratamiento, manteniendo la tendencia observada en años recientes, y se espera que esta situación permanezca relativamente inalterada en 2024. La producción a partir de gas natural sin tratamiento representa aproximadamente dos tercios del total. El Medio Oriente desempeña un papel fundamental, generando el 20% del hidrógeno a partir de este tipo de gas, mientras que Estados Unidos y China en conjunto aportan alrededor de una cuarta parte.

La gasificación de carbón sin tratamiento constituye el 20% del total mundial en 2023, concentrándose principalmente en China. Además, más del 15% del

hidrógeno global se produce como subproducto en refinerías y en la industria petroquímica, derivado de procesos como la reformación de nafta.

La producción de hidrógeno de bajas emisiones ha mostrado un crecimiento marginal en los últimos dos años, permaneciendo por debajo de 1 Mtpa de H_2 y representando menos del 1% de la producción total. Este tipo de hidrógeno se genera principalmente a partir de combustibles fósiles con captura y almacenamiento de carbono (CCUS). La producción de hidrógeno mediante electrólisis aún constituye solo una fracción pequeña del total, manteniéndose por debajo de 100 kt de H_2 en 2023, y se concentra principalmente en China, Europa y Estados Unidos, que en conjunto representan aproximadamente el 75% de la producción global de hidrógeno electrolítico.

Europa (25%), América Latina (15%) y Estados Unidos (15%) conforman más de la mitad del potencial de producción de hidrógeno de bajas emisiones para 2030. En el continente europeo, se estima que casi 8 Mtpa de hidrógeno de bajas emisiones podrían generarse mediante electrólisis para 2030 (más de 5 Mtpa si se excluyen los proyectos en etapas muy tempranas de desarrollo). España (20%), Dinamarca (12%) y Alemania (10%) lideran en cuanto a proyectos anunciados de electrólisis de agua, y podrían representar más del 40% de la producción de hidrógeno de bajas emisiones en Europa para 2030.

En Australia, la producción de hidrógeno a través de electrólisis podría alcanzar casi 6 Mtpa para 2030 (aproximadamente 1.5 Mtpa si se excluyen proyectos en etapas muy iniciales). La abundancia de recursos solares y eólicos a bajo costo, así como su proximidad al mercado asiático, podrían posicionar a Australia como uno de los principales exportadores de hidrógeno y combustibles derivados de este elemento. Una tendencia similar se observa en Chile, donde se han anunciado varios proyectos de hidrógeno electrolítico, cada uno con una capacidad superior a 1 GW, aunque cerca de la mitad de esta capacidad se encuentra en fases muy tempranas de desarrollo. La producción potencial de hidrógeno de bajas emisiones de estos proyectos en Chile asciende a casi 4 Mtpa (2 Mtpa si se excluyen los proyectos en etapas muy preliminares), lo que representa más de la mitad de la producción de hidrógeno electrolítico de bajas emisiones proyectada para América Latina para 2030.

A nivel nacional y con fecha de septiembre 2024 se tiene un total de 73 proyectos presentados en varias etapas de desarrollo, con una capacidad nominal de electrólisis de 26,4 GW. Aproximadamente el 47% de los proyectos está destinado al mercado interno, un 28% a la exportación, mientras que la parte restante no ha sido especificada.

- Zona norte: 26
- Zona centro: 14
- Zona sur: 22
- Sin información de ubicación: 2

Mapa de proyectos en desarrollo septiembre 2024



(H2Chile, 2024)

Si de aquí al 2030 todos los proyectos anunciados llegan a estar en funcionamiento, se estima una producción total de 3.5 Mtpa de H₂V, donde junto a Brasil contarían con la producción del 80% del total de la región latinoamericana.

9. DESARROLLO DE PROYECTOS Y CASOS ACTUALES

Respecto al desarrollo de proyectos en Chile, el gobierno busca impulsar el desarrollo de estos facilitando todos los procesos que involucrados, es por esto que, en el primer trimestre de 2022 se formó el Comité para el Desarrollo de la Industria del Hidrógeno Verde, con la finalidad de impulsar un crecimiento sostenible en este sector y mejorar la colaboración entre los ministerios y servicios públicos pertinentes al H₂V. Este comité fue diseñado para integrar a varios actores clave, incluyendo al gobierno, la comunidad, el sector privado y entidades internacionales, con el objetivo de facilitar las iniciativas necesarias para el avance adecuado de la industria.

La organización del comité incluyó un grupo interministerial liderado por el ministro de energía, así como una mesa técnica y un comité consultivo. En las instancias se reunieron de manera regular para fomentar el diálogo, coordinar esfuerzos y promover diversas iniciativas, programas y actividades que contribuyan al desarrollo de esta industria.

9.1. Uso de terrenos públicos

Desde 2010, Chile ha impulsado el desarrollo de energías renovables no convencionales (ERNC) mediante un Convenio Marco de Colaboración entre el Ministerio de Bienes Nacionales (MBN) y el Ministerio de Energía. Este acuerdo ha permitido la implementación de proyectos en terrenos fiscales, asegurando así que el Estado facilite el acceso a estos espacios para fomentar la inversión en energías limpias. A lo largo de los años, este convenio ha sido renovado, adaptándose a las necesidades del sector energético y respaldando el hecho de que se trata de una política de estado transversal la cual se ha llevado a cabo en todos los gobiernos hasta hoy.

Una de las actualizaciones más recientes de este convenio se centra en el hidrógeno verde, incluyendo explícitamente sus derivados y la infraestructura necesaria para su producción y almacenamiento. Este enfoque resalta la importancia

del hidrógeno verde como una fuente de energía del futuro y destaca la relevancia de los terrenos fiscales en su desarrollo. En este contexto, el país busca maximizar el uso de sus recursos naturales a través de iniciativas innovadoras.

Particularmente, la región norte de Chile es un punto clave debido a su excepcional recurso solar. Aquí, el 52% de los terrenos fiscales está disponible para proyectos de energías renovables, lo que representa una oportunidad significativa para desarrollar infraestructura de hidrógeno verde. Las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama son zonas estratégicas que pueden jugar un papel crucial en la transición energética del país.

El MBN ha entregado un total de 266 concesiones onerosas para proyectos de ERNC en terrenos públicos desde 2009. La entrega de estos terrenos se efectúa mediante contratos de concesión onerosa, lo permite a los inversionistas a utilizar terrenos fiscales a largo plazo mediante contratos que van de 30 a 40 años. Este modelo asegura que las empresas no solo accedan a tierras adecuadas, sino que también contribuyan al desarrollo económico ya que deben realizar pagos anuales que representan el 6% del valor comercial del terreno, pagos conocidos como renta concesional. Para incitar el desarrollo de la industria, se optó por un sistema de pago de esta renta concesional que crece dependiendo del estado en que se encuentra el proyecto, teniendo la siguiente estructura:

- **Estudios y evaluación ambiental:** 30% de la renta concesional anual.
- **Construcción:** 50% de la renta concesional anual.
- **Operación:** 100% de la renta concesional anual.

Cabe mencionar, que de esta renta concesional anual un 65% ingresará al Fondo Nacional de Desarrollo Regional por lo que se verán reflejados en el impulso de desarrollo social, económico y cultural de cada región donde se realice el proyecto.

En noviembre de 2021, se lanzó el Plan Nacional de Fomento a la Producción de Hidrógeno Verde en Territorio Fiscal, conocido como "Ventana al Futuro". Este plan ofrece una oportunidad única para que los interesados presenten solicitudes de concesión sobre terrenos fiscales destinados a la producción de hidrógeno verde. Este enfoque busca acelerar el desarrollo de esta industria emergente, facilitando la inversión y la creación de infraestructura necesaria.

Hasta la fecha, el Plan ha recibido 16 solicitudes para proyectos de hidrógeno verde, la mayoría de las cuales se localizan en las regiones de Tarapacá y Antofagasta. Esto demuestra un interés creciente en la implementación de tecnologías de hidrógeno en áreas con un alto potencial de recursos renovables. Los proyectos varían en escala, desde iniciativas más pequeñas hasta desarrollos de gran envergadura.

Los terrenos destinados a estos proyectos se encuentran en diferentes etapas administrativas, lo que incluye la elaboración de planes ministeriales y la fijación de valores. Se espera que la mayoría de los permisos se otorguen durante el año 2024, lo que representa un avance significativo en la agenda energética del país. Esta rápida tramitación es vital para mantener el impulso en la industria del hidrógeno.

El uso de terrenos públicos para proyectos de hidrógeno verde no solo contribuye a la diversificación de la matriz energética de Chile, sino que también genera empleo y activa las cadenas de valor locales. Este enfoque integral no solo beneficia a los inversionistas, sino que también promueve el desarrollo sostenible y el bienestar de las comunidades en las que se implementan estos proyectos. (Gobierno de Chile, 2024)

9.2. Infraestructura de transporte y logística

Más allá de la producción como tal de H₂V, es importante contar con la infraestructura necesaria para la logística y transporte, como por ejemplo puertos, aeropuertos, pasos fronterizos, conectividad vial, entre otros, como se detalla a continuación.

9.2.1. Pasos fronterizos

Las fronteras de Chile cuentan con diversas instalaciones que facilitan el tránsito de mercancías, servicios y personas hacia los países limítrofes, lo que impulsa el comercio y fortalece la integración regional. En total, el país tiene 36 pasos fronterizos operativos. Entre ellos, seis están destinados a la conexión con Bolivia, 29 se ubican a lo largo de la frontera con Argentina, y uno conecta Chile con Perú en el norte, específicamente en la provincia de Arica. Cada año, estos puntos de cruce manejan un volumen de carga que supera los 16,6 millones de toneladas. Los siguientes son considerados los principales pasos: (Gobierno de Chile, 2024)

1. **Cristo Redentor (Los Libertadores)**

Región: Valparaíso

Ingreso: 5,18 MM Ton

Salida: 1,28 MM Ton

2. **Chungará**

Región: Arica y Parinacota

Ingreso: 1,39 MM Ton

Salida: 1,20 MM Ton

3. **Integración Austral (Monte Aymond)**

Región: Magallanes y la Antártica Chilena

Ingreso: 0,81 MM Ton

Salida: 0,84 MM Ton

4. **San Sebastián**

Región: Magallanes y la Antártica Chilena

Ingreso: 0,61 MM Ton

Salida: 0,96 MM Ton

5. **Colchane**

Región: Tarapacá

Ingreso: 0,32 MM Ton

Salida: 0,95 MM Ton

6. **Concordia (Chacalluta)**

Región: Arica y Parinacota

Ingreso: 0,58 MM Ton

Salida: 0,40 MM Ton

7. **Pino Hachado (Liucura)**

Región: La Araucanía

Ingreso: 0,52 MM Ton

Salida: 0,11 MM Ton

8. **Cardenal Samoré (Puyehue)**

Región: Los Lagos

Ingreso: 0,16 MM Ton

Salida: 0,28 MM Ton

9. **Ollagüe**

Región: Antofagasta

Ingreso: 0,26 MM Ton

Salida: 0,16 MM Ton

10. **Jama**

Región: Antofagasta

Ingreso: 0,25 MM Ton

Salida: 0,14 MM Ton

9.2.2. Red de aeropuertos

La red de aeropuertos en el país se clasifica en cuatro tipos de terminales:

1. **Red Principal:** Esta incluye siete aeropuertos clave y nueve aeródromos, formando la columna vertebral de la conectividad aérea y manejando la mayor parte del tráfico tanto de pasajeros como de carga.
2. **Red Secundaria:** Comprende 14 aeródromos que aseguran la conexión en regiones y zonas que no cuentan con acceso a los aeropuertos principales.
3. **Red Militar de Aeródromos:** Consta de 11 instalaciones exclusivamente dedicadas a operaciones militares.

4. **Red de Aeródromos Menores:** Ofrece conectividad en niveles local y regional en áreas específicas.

Desde el ángulo del transporte de carga, el sector aéreo transporta cerca de 449,4 mil toneladas al año, incluyendo tanto carga como correspondencia. (Gobierno de Chile, 2024)

9.2.3. Redes marítimas

Chile cuenta en la actualidad con una amplia gama de rutas marítimas que lo conectan con importantes mercados globales, incluyendo el cono sur, Europa, Estados Unidos, Asia y Centroamérica. Además de las conexiones internacionales, el cabotaje marítimo es vital para el transporte de bienes y personas dentro del país, especialmente en regiones aisladas donde el acceso terrestre es limitado o inexistente.

Con un total de 18 rutas, Chile tiene relaciones comerciales firmes, con paradas directas en 53 puertos, lo que incluye tanto enlaces nacionales como internacionales. Esta red marítima es esencial para facilitar el comercio y la logística. En particular, considerando la creciente demanda de hidrógeno verde (H2V) y sus derivados, estas conexiones marítimas serán fundamentales para exportar y distribuir estos productos desde las áreas de producción hasta los consumidores, tanto a nivel nacional como internacional.

Mapa de rutas marítimas chilenas 2023



La infraestructura ferroviaria de Chile, que abarca 5.223 km, es fundamental para el transporte y la logística en el país. Se divide en dos sectores principales:

- En 2022, la red ferroviaria trasladó cerca de 24,7 millones de toneladas, con un enfoque principal en la zona norte del país. Este dato es relevante porque en esta región se planea establecer uno de los valles de hidrógeno según la Estrategia

Nacional de Hidrógeno Verde del Ministerio de Energía. Por lo tanto, el ferrocarril es un medio de transporte esencial para la logística de esta macrozona y las industrias que allí se desarrollarán. (Gobierno de Chile, 2024)

Figura 9:

Mapa red ferroviaria de Chile



(Gobierno de Chile, 2024)

9.3. Regulación de proyectos

Bajo la finalidad de comenzar a generar un marco regulatorio para la industria de hidrógeno verde en Chile, se optó por modificar dos cuerpos legales que formaban parte del Ministerio de Minería para traspasarlos al Ministerio de Energía. Esto de modo que las competencias respecto al hidrógeno y sus derivados sean reguladas por este como un combustible más bajo la Ley 21.205.

A modo de impulsar el buen desarrollo de la de la industria, hoy en día existen en el país tres iniciativas para guiar sobre los requisitos que se deben cumplir para el correcto funcionamiento de los proyectos, complementándose a la regulación ambiental y sectorial. Detalladas a continuación,

1. Postulación como proyecto especial a partir de la “Guía de apoyo para solicitud de autorización de proyectos especiales de Hidrógeno” de la Superintendencia de Electricidad y combustibles (SEC):

Se aplica a todos los proyectos que impliquen instalaciones vinculadas con el desarrollo, tratamiento, transporte, almacenamiento o uso de hidrógeno. Los proyectos especiales ofrecen a la SEC la capacidad de autorizar iniciativas que empleen tecnologías distintas a las estipuladas en el Decreto Supremo N°66 de 2007, emitido por el Ministerio de Economía y actualmente bajo la supervisión del Ministerio de Energía. Mientras no exista una regulación específica sobre los procesos productivos del hidrógeno, esta opción facilita la aprobación de aspectos dentro del ámbito de la SEC.

La guía disponible establece las pautas necesarias para el proceso de autorización, los tiempos involucrados y la documentación técnica y de seguridad exigida para los proyectos especiales que utilicen hidrógeno como combustible. Asimismo, la SEC revisa cada proyecto para asegurar que no represente un peligro ni para las personas ni para el medio ambiente, otorgando así un visto bueno para la implementación y operación de estos proyectos. Esta autorización es esencial para que los interesados puedan registrar sus instalaciones antes de iniciar su operación, cumpliendo con la legislación vigente.

La modalidad abarca cualquier tipo de instalación relacionada con la producción y uso del hidrógeno. Los proyectos especiales brindan un marco para que la SEC pueda autorizar iniciativas que no están contempladas en la normativa anterior, asegurando que la regulación se adapte a las nuevas tecnologías. Mientras se desarrolla una normativa específica para los procesos de producción de hidrógeno, esta opción permite que la SEC se pronuncie sobre los aspectos pertinentes a su competencia.

Este documento proporciona una orientación clara sobre los requisitos del proceso, el tiempo de espera y la documentación necesaria para proyectos especiales enfocados en el hidrógeno. Además, la SEC se asegura de que los

proyectos no representen riesgos para la comunidad ni para el medio ambiente, ofreciendo una autorización para la puesta en marcha y operación de estas iniciativas. Esta aprobación es un paso crucial que permite a los solicitantes registrar sus instalaciones antes de iniciar su funcionamiento, en línea con las normativas actuales. (Gobierno de Chile, 2024)

2. “Guía de Implementación de Pilotos y validación de tecnologías que utilizan hidrógeno como combustible en minería” del Servicio Nacional de Geología y Minería:

Esta guía tiene como finalidad facilitar la gestión de proyectos de hidrógeno en el ámbito de la minería, los cuales están sujetos a la supervisión del Sernageomin. El documento define estándares y criterios de evaluación que son necesarios para la obtención de permisos. Además, simplifica el proceso de solicitud para los proponentes, asegurando que se valide la seguridad de manera efectiva y continua. (Gobierno de Chile, 2024)

3. “Decreto 67: Establece requisitos técnicos y administrativos para la autorización de proyectos experimentales del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones”:

Para los proyectos de hidrógeno que se enfoquen en la movilidad en espacios públicos, el presente decreto establece los lineamientos necesarios para obtener la autorización de su implementación, con el Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones supervisando el proceso. Su principal objetivo es analizar y evaluar nuevas tecnologías aplicadas al transporte, que incluyen tanto vehículos sin motor como motorizados, así como remolques y semirremolques, junto con su contexto.

Adicionalmente, el sitio web del Ministerio de Energía y la asociación H2Chile proporcionan un compendio de normativas que respaldan diversas aplicaciones y métodos de producción de hidrógeno. (Gobierno de Chile, 2024)

9.4. Regiones estratégicas para desarrollo de proyectos

9.4.1. Región de Magallanes

La actividad económica principal de la región se basa en la ganadería, así como en la extracción y procesamiento de hidrocarburos. Actualmente, este sector representa el 1% del Producto Interno Bruto (PIB), y se espera que la industria del hidrógeno verde (H2V) tenga el potencial de aumentar esta cifra hasta un 10% en el transcurso de la próxima década.

La región cuenta con infraestructura portuaria en Punta Arenas, específicamente en el Terminal José de los Santos Mardones y el Terminal Arturo Prat. Además, se han propuesto nuevos terminales portuarios para las posibles comunas productoras de H2, en colaboración entre la Empresa Portuaria Austral y la Empresa Nacional del Petróleo (ENAP), junto con empresas privadas que están desarrollando proyectos de H2V en la zona. La ubicación estratégica de los puertos de San Gregorio y Laredo permite un acceso fácil a los océanos Atlántico y Pacífico.

Respecto a las conexiones viales, la carretera que conecta Punta Arenas con el Paso Fronterizo Monte Aymond (Paso Integración Austral), que facilita el acceso a Argentina, es de suma importancia. Esta ruta comenzará su ampliación en 2024, considerando las necesidades de la industria del H2.

La Estrategia Regional de Desarrollo (ERD) 2023-2030 presenta las directrices clave para la región en términos de desarrollo energético y otros temas relevantes, con un enfoque a mediano y largo plazo, que toma en cuenta las diversas iniciativas de participación ciudadana realizadas para construir esta visión regional.

Cabe destacar que en la región de Magallanes y la Antártica Chilena, se implementan ventajas específicas para fomentar las inversiones en dicha zona, tales como la Ley Navarino, la Ley Tierra del Fuego y el Régimen de Zonas Francas. (Gobierno de Chile, 2024)

9.4.2. Región de Antofagasta

La minería es la actividad económica más importante en la región de Antofagasta, la cual se sitúa como líder global en la producción de cloruro de litio, molibdeno y cobre, contribuyendo con un 12% al Producto Interno Bruto (PIB) de Chile. La alta demanda energética y la emisión de gases de efecto invernadero (GEI)

por parte de esta industria subrayan la urgencia de adoptar tecnologías más limpias y eficientes, ya que, en 2021, el sector fue responsable del 58% de las emisiones totales de GEI. Es fundamental mencionar que la mayor parte de estas emisiones proviene de la quema de combustibles fósiles.

Esta situación ofrece una oportunidad significativa, no solo porque la región posee un alto potencial para la generación de energía solar, en gran parte en terrenos estatales que podrían convertirse en aliados en este proceso, sino también debido a la elevada demanda de energía que presenta el sector minero. En los últimos años, la minería ha desempeñado un papel clave en la promoción de energías renovables, incorporándolas en su fuente de energía, lo que ha llevado a una reducción de 4.455 KtCO₂ eq. en emisiones durante 2021.

Además, el crecimiento industrial en esta área ha resultado en la creación de infraestructuras que pueden ser reutilizadas para la producción de hidrógeno, tales como puertos y carreteras. Igualmente, el cierre de las plantas de carbón generará espacios abandonados, como puertos para la carga de carbón y sistemas de captación de agua, que también pueden ser utilizados en el futuro.

En cuanto al suministro de agua, la extrema aridez de la región ha impulsado el desarrollo de la desalinización, principalmente para el consumo humano y las necesidades mineras. Actualmente, hay dos grandes plantas desalinizadoras que en conjunto producen alrededor de 5.000 L/s. Las plantas ubicadas en Antofagasta y Tocopilla son adecuadas para el consumo humano, posicionando a esta ciudad como la primera en Latinoamérica en depender totalmente de este sistema.

En términos de importaciones de amonio en la región, en 2019 se reportaron 347 mil toneladas, dirigidas principalmente a las operaciones de la empresa Enaex, que se especializa en la producción de explosivos y nitrato de amonio para el sector minero. (Gobierno de Chile, 2024)

9.4.3. Región del Bio Bio

La región presenta condiciones favorables para el desarrollo de un ecosistema industrial, al contar con siete puertos industriales que manejan la carga de los sectores forestal, pesquero e industrial de la macrozona centro-sur, así como con actividades relacionadas con la refinación de petróleo, la industria siderúrgica,

química, y de celulosa y papel. Además, en la zona de Coronel, que está en proceso de transición, se localizan dos plantas de carbón inactivas y una operativa. Convertir esta área industrial en un centro para la promoción del hidrógeno verde ofrece una gran oportunidad para aumentar la demanda local de hidrógeno en el corto plazo y contribuir a la descarbonización.

Es relevante destacar que la región cuenta con aproximadamente 5.500 MW de capacidad eólica para la producción de energía renovable, con un factor de planta promedio del 33%, además de una infraestructura de transmisión eléctrica significativa que facilita la conexión de proyectos. Estas condiciones son propicias para establecer un núcleo de hidrógeno en la región. Este proceso ya se está impulsando a través de iniciativas como la Alianza Estratégica de Hidrógeno Verde para el Biobío, que busca identificar y fomentar colaboraciones que estimulen la inversión en la cadena de valor del H2V en la zona, así como el Programa Estratégico Regional (PER) de Hidrógeno Verde. (Gobierno de Chile, 2024)

9.4.4. Valle central

Es muy relevante considerar la región central como focos de desarrollo de hidrógeno verde. Aunque las regiones de Antofagasta y Magallanes poseen el mayor y más importante foco. Las regiones de Valparaíso, Metropolitana y Biobío, con potencial de producción, también son significativas no solo en términos de producción, sino también en lo que respecta al uso final de hidrógeno y sus derivados. Esto posibilita fomentar la transformación productiva a través de la transición de las áreas industriales desde industrias que generan contaminantes a las que no lo hacen, utilizando de nuevo la infraestructura existente. (Gobierno de Chile, 2024)

9.5. Casos

A continuación, se detallan algunos de los principales proyectos de hidrógeno verde, tanto operativos como en proceso. Justificando así las oportunidades que se tienen a nivel nacional para una industria de esta índole y como se está llevando a cabo la inversión en este ámbito.

9.5.1. Proyecto HNH Energy

Ubicado en la región de Magallanes, específicamente en la bahía Gregorio, este proyecto contempla ser el más grande a nivel nacional hasta la fecha en cuanto a la industria de hidrógeno verde. Este se llevará a cabo por el consorcio HNH en el

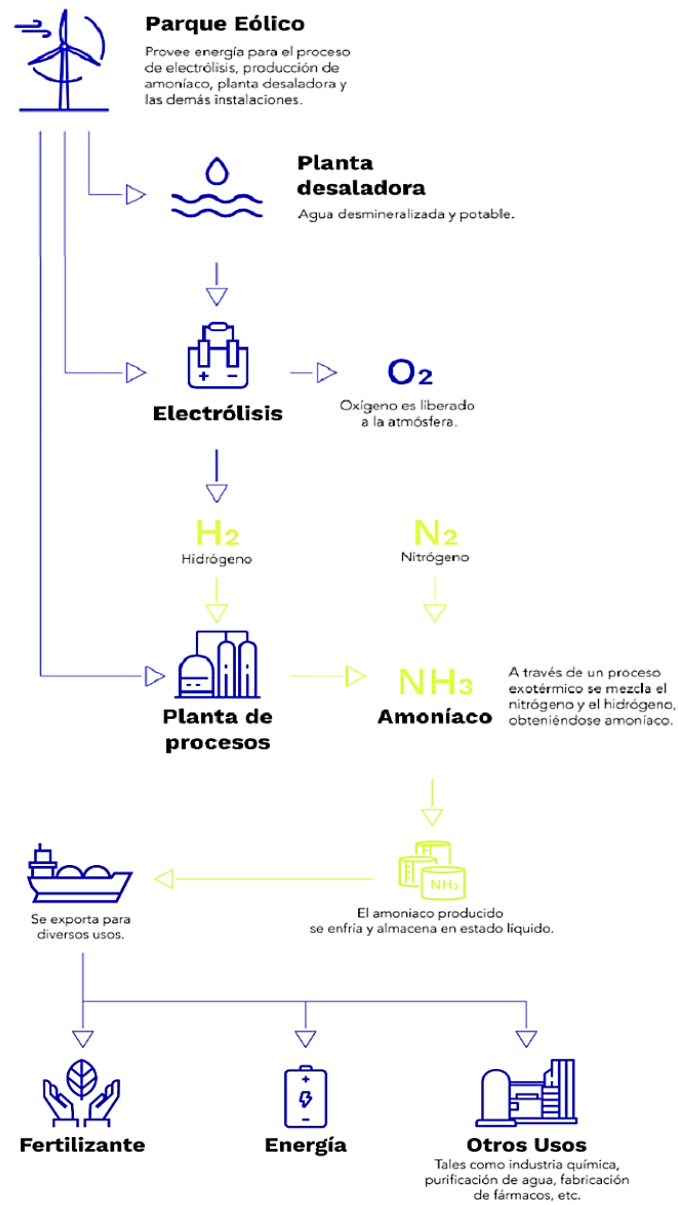
cual participan las empresas socias Copenhagen Infrastructure Partners (donde invierten los fondos de pensiones daneses, alemanes e ingleses), Austria Energy y Okowind (ambas empresas austriacas dedicadas a las energías renovables).

El proyecto contempla una inversión por 11 mil millones de dólares, convirtiéndose en la inversión más grande realizada para la industria de hidrógeno verde y también el costo de inversión más alto ingresado al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). Esta inversión contemplara un parque eólico (30 mil hectáreas), una planta de procesos de electrolización, una planta de almacenamiento y distribución, una planta desaladora y finalmente un puerto para importación y exportación. (HNH Energy, 2024)

El principal foco de HNH Energy será la producción y exportación de amoníaco verde, producido a partir de hidrógeno verde, donde se espera una capacidad de generación eólica de 1,4 GW, con una capacidad de producción de 270.000 toneladas de hidrógeno verde al año y una producción de amoníaco verde de 1,3 millones de toneladas anuales. Además, las instalaciones estarán habilitadas para importación y exportación. Esto también se verá traducido como una reactivación económica del territorio, ya que fomentará la generación de empleos (4.000 en su fase de construcción, 1.800 en su fase de operación), considera la integración de proveedores locales en la cadena de valor y genera aporte en la formación de capital humano. En la siguiente figura se detalla el procedimiento operacional que tendrá el proyecto para la producción de amoníaco verde:

Figura10:

Producción de amoníaco verde en HNH Energy



(HNH Energy, 2024)

En cuanto a la evolución del proyecto en el tiempo, se tiene la siguiente planificación para los próximos años:

- 2019-2024: Diseño de proyecto, EIA y participación temprana en definiciones técnicas y elaboración del estudio de impacto ambiental.
- 2024-2026: SEIA y obtención de permisos sectoriales.

- 2027-2030: Fase de construcción.
- 2030: Inicio de las operaciones.

Cabe destacar que el Servicio de Evaluación Ambiental acogió a trámite de Estudio de impacto ambiental el proyecto en cuestión con fecha Julio 2024.

Finalmente, se rescata una entrevista en el medio La Segunda del director general del proyecto HNH Energy, Mario Marchese, ingeniero químico de la UTFSM, donde se explica un poco de cómo surgió el proyecto y el financiamiento, donde se remarca la importancia de la inersión y los compromisos de compra. Dicha entrevista se puede encontrar en el anexo.

9.5.2. Proyecto Haru Oni

Con inicio de proyecto en julio de 2021 y ubicado en el Fundo Tehuel Aike, Punta Arenas en la región de Magallanes, este proyecto se destaca por ser el primero a escala industrial en Chile y la primera planta en funcionamiento de e-combustible casi neutro en emisiones de CO₂ en el mundo. Fue llevado a cabo por HIF Global y en colaboración con Siemens Energy, Exxon Mobil, ENAP, Gasco y Enel Green Power Chile . (HIF, 2021)

El foco de este proyecto es la producción de e-combustibles, fabricados a partir de hidrógeno verde producido por ellos el cual a través de un proceso de síntesis se combina con CO₂ capturado de una fuente biogénica para producir así gasolina verde sintética (e-gasoline) y gas licuado sintético (e-LG). Cabe destacar que este combustible puede ser utilizado en vehículos, aviones y barcos. (HIF, 2021)

La planta cuenta con 3,7 hectáreas de superficie con aerogeneradores que pueden producir 3,4 MW, una capacidad del electrolizador de 1,2 MW y la producción total de 130.000 L/año de e-gasolinas. Este proyecto tuvo una inversión total de 78 millones de dólares, de los cuales 8,23 millones fueron financiados por el gobierno alemán, así lo declaró en un comunicado de prensa Peter Altmaier quien en su momento fuera ministro federal de economía y energía del gobierno alemán. (Energy partnership Chile-Alemania, 2020)

Empresas como Porsche y sus socios internacionales trabajan en colaboración con este proyecto. El 19 de mayo de 2024 se realizó la Porsche Mobil 1 Supercup donde los 30 deportivos que participaron ocuparon las e-gasolinas producidas en

Haru Oni. El gerente regional para Latinoamérica de HIF Global, Víctor Turpaud, declaró lo siguiente: “Hemos exportado más de 46.600 litros de e-combustible para ser utilizados por ejemplo en la Porsche Mobil 1 Super Cup y otros eventos de demostración, una gran oportunidad de mostrar que los combustibles a base de hidrógeno verde son una solución para acelerar la descarbonización del planeta. Escalar esta tecnología es clave para avanzar, por eso estamos desarrollando proyectos en Chile, Estados Unidos, Australia y Uruguay”. (Ovejero Noticias , 2024)

En cuanto a la exportación, antes de salir de Chile, el combustible es sometido a un estricto control de calidad, con seguimiento de parámetros 24/7 y análisis diarios de muestras. Una vez en Europa, la e-Gasolina pasa por un proceso de mezcla con aditivos para llegar a una de 98 octanos baja en carbono.

9.5.3. Proyecto Volta

El siguiente proyecto no se encuentra operativo, sino que en proceso de validación por el SEIA. Es llevado a cabo por la empresa MAE (Mejillones Amnomia Energy) y estará ubicado a 8 kilómetros de la ciudad de Mejillones, región de Antofagasta, una ubicación estratégica dado que es una de las principales zonas portuarias de Chile, ya que cuenta con una robusta infraestructura de abastecimiento de agua y redes eléctricas y, actualmente, es el único puerto que forma parte de las rutas internacionales de amoníaco.

El proyecto cuesta una inversión por 2500 millones de dólares e implica la construcción y operación de una planta industrial para la producción de amoníaco a partir de hidrógeno verde la cual tendrá una capacidad de producción de 620.000 toneladas de amoníaco anuales, alcanzando esta capacidad en dos etapas de aproximadamente 310.000 toneladas cada una. El amoníaco será transportado por un ducto hasta el puerto de Mejillones, desde donde se distribuirá a los mercados, con la opción de comercialización local a través de una estación de carga en la misma planta.

La producción de amoníaco se realizará mediante el proceso de síntesis Haber-Bosch, que combina hidrógeno verde, obtenido de la electrólisis de agua usando energía renovable, con nitrógeno extraído del aire. La planta contará con todos los equipos necesarios para la producción y almacenamiento de hidrógeno,

incluyendo sistemas de tratamiento de agua, almacenamiento, y equipos de seguridad para los trabajadores.

El proyecto considera la instalación de dos trenes de electrolizadores, cada uno con capacidad para producir 55.000 toneladas de hidrógeno anuales, lo que permitirá alcanzar una producción total de 110.000 toneladas de hidrógeno verde al año. El agua necesaria para la electrólisis será suministrada por plantas desalinizadoras locales, además de utilizar aguas residuales tratadas que actualmente se descargan al mar.

Para abastecer la planta de la energía renovable necesaria, se instalará una planta solar fotovoltaica de 600 MW en un terreno de 900 hectáreas, situada 8 km al sur de la planta de amoníaco. La energía generada se transmitirá mediante líneas de transmisión de 220 kV que conectarán ambas instalaciones y también la subestación Los Changos, parte del Sistema Eléctrico Nacional.

Al operar a su máxima capacidad, la planta reducirá más de 1 millón de toneladas de CO₂ al año en comparación con la producción convencional de amoníaco con energía no renovable, contribuyendo así a la descarbonización de la industria y a la lucha contra el cambio climático. (MAE, 2023)

Las etapas del proyecto Volta son las siguientes:

- 2022-2023: Relacionamiento comunitario inicial.
- 2024: Presentación de Estudio de Impacto Ambiental.
- 2025: Construcción primera fase.
- 2027: Construcción segunda fase.

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo de la industria del hidrógeno verde en Chile se ha posicionado como una de las grandes oportunidades estratégicas para el país, tanto en el ámbito energético como económico. Chile, al contar con un vasto potencial de recursos renovables, particularmente solar y eólico, se encuentra en una posición privilegiada para convertirse en un actor clave en la producción y exportación de hidrógeno verde a nivel mundial. Este proceso de creación de hidrógeno verde está respaldado por el proceso de electrólisis, una tecnología fundamental para la producción de hidrógeno

limpio, que, cuando se alimenta de fuentes de energía renovables, ofrece una solución viable para la descarbonización de sectores clave de la economía global.

Desde un punto de vista teórico, se destacó la importancia del hidrógeno verde como una fuente de energía que no solo contribuiría a la transición energética global, sino también a la lucha contra el cambio climático, al ser una fuente energética libre de emisiones de carbono. La integración de las energías renovables en la matriz energética de Chile, especialmente la energía solar fotovoltaica y eólica, permite al país producir hidrógeno verde a un costo más que competitivo, lo que refuerza su atractivo como productor y proveedor internacional.

Uno de los pilares para el crecimiento de esta industria en Chile es la política gubernamental, que ha mostrado un interés creciente en apoyar el desarrollo de esta tecnología. Las políticas públicas, los incentivos fiscales y las regulaciones claras han sido fundamentales en el proceso de consolidación de la industria. Es imperativo que el gobierno continúe con la implementación de estrategias de apoyo, que no solo faciliten la inversión en proyectos de hidrógeno verde, sino que también fomenten la innovación tecnológica y la creación de infraestructuras críticas para su desarrollo.

En cuanto al análisis PESTEL, se ha identificado que el contexto político y económico de Chile es favorable para el impulso de la industria del hidrógeno verde. Sin embargo, persisten ciertos obstáculos en áreas clave, como los costos de producción, que aún son elevados en comparación con otras fuentes de energía. Este factor, si bien constituye un desafío, también representa una oportunidad para la inversión en investigación y desarrollo, con el fin de mejorar la eficiencia de los procesos de producción y reducir los costos asociados. Además, la estabilidad económica y el entorno favorable para las inversiones ofrecen un panorama prometedor para los proyectos en curso y para futuras inversiones internacionales.

Por otro lado, las oportunidades que surgen del análisis social son considerables. La industria del hidrógeno verde tiene el potencial de generar nuevos empleos, fomentar la equidad de género y promover la capacitación técnica y profesional en las comunidades locales, especialmente en las regiones que se perfilan como estratégicas para la producción de hidrógeno, como Magallanes, Antofagasta y el Valle Central. Es esencial que la industria incorpore estos aspectos en su desarrollo, asegurando que los beneficios de esta transición energética sean compartidos de

manera equitativa entre todos los sectores de la sociedad, sin dejar atrás a las comunidades locales.

A nivel tecnológico, el hidrógeno verde está estrechamente vinculado con la innovación y la necesidad de infraestructura adecuada para su producción, almacenamiento y distribución. En este sentido, Chile debe hacer frente al desafío de invertir en las tecnologías necesarias para establecer una infraestructura robusta que permita no solo la producción interna, sino también la exportación de hidrógeno verde a mercados internacionales.

El impacto ambiental positivo del hidrógeno verde es otro de los grandes atractivos que este sector presenta, tanto para el país como para los mercados internacionales. El uso de recursos naturales renovables, junto con la baja huella de carbono del hidrógeno, puede contribuir significativamente a la descarbonización de sectores industriales y de transporte, posicionando a Chile como un líder en la producción de energía limpia y sustentable. Sin embargo, este desarrollo debe ser gestionado de manera responsable, con un enfoque en la sostenibilidad y en la protección del medio ambiente, para evitar impactos negativos en los ecosistemas locales y las comunidades cercanas a las zonas de producción.

Las alianzas internacionales y las colaboraciones público-privadas juegan un rol crucial en el éxito de la industria del hidrógeno verde en Chile. La cooperación con instituciones de investigación, universidades y actores globales puede acelerar el proceso de innovación y contribuir al fortalecimiento de la infraestructura tecnológica y de conocimiento en el país. Además, la participación en redes internacionales y el establecimiento de acuerdos de cooperación en proyectos de investigación y desarrollo permitirán a Chile mantenerse a la vanguardia en la producción y uso del hidrógeno verde.

Los proyectos actuales, como los de HNH Energy, Haru Oni y Volta, son ejemplos concretos del camino que Chile está siguiendo para consolidar su posición en este sector. Estos proyectos no solo reflejan el potencial del país, sino también la necesidad urgente de adaptar y mejorar la infraestructura logística, desde redes de transporte hasta instalaciones de almacenamiento y distribución de nivel global, para garantizar la viabilidad de la industria a largo plazo.

En resumen, el panorama de la industria del hidrógeno verde en Chile es altamente prometedor, pero aún enfrenta desafíos importantes que requieren una acción coordinada entre el sector público, privado y las comunidades. La combinación de recursos naturales, políticas gubernamentales de apoyo, avances tecnológicos e inversiones en infraestructura son clave para transformar a Chile en un líder mundial en la producción de hidrógeno verde. Si el país logra superar los obstáculos existentes y aprovechar las oportunidades que se presentan, la industria del hidrógeno verde no solo contribuirá a la descarbonización global, sino que también impulsará el crecimiento económico, la creación de empleos y el bienestar social en las comunidades involucradas, posicionando a Chile como un referente global en energía limpia y sostenible.

REFERENCIAS

- Arima. (Julio de 2023). *Ariema*. Obtenido de <https://www.ariema.com/almacenamiento-de-h2>
- Cancino Silva, R. B. (2021). *Producción y almacenamiento de hidrógeno verde para aplicaciones energéticas en Chile*. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Mecánica.
- Energy partnership Chile-Alemania. (2 de 12 de 2020). *Energy partnership Chile-Alemania*. Obtenido de Energy partnership Chile-Alemania
- García Bernal, N. T. (2024). *Desarrollo del mercado de hidrógeno verde en Chile*. Comisión de Minería y Energía del Senado.
- Generadoras de Chile. (2021). *Generadoras de Chile*. Obtenido de <https://generadoras.cl/tipos-energia/hidrogeno-verde>
- GH2. (2024). *Green Hydrogen Organisation*. Obtenido de <https://gh2.org/countries/chile>
- Gobierno de Chile. (2023). *Plan de acción hidrógeno verde 2023-2030*. Ministerio de Energía. Obtenido de https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/plan_de_accion_hidrogeno_verde_2023-2030.pdf
- Gobierno de Chile. (2024). *HIDRÓGENO VERDE EN CHILE*.
- H2 Chile. (19 de 08 de 2020). *H2 Chile*. Obtenido de <https://h2chile.cl/2020/08/empresa-colbun-es-parte-de-h2-chile/>
- H2Chile. (Septiembre de 2024). *H2Chile*. Obtenido de <https://h2chile.cl/mapa-de-proyectos/>
- Herrera, j. P. (2023). *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*. Obtenido de https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/35369/2/Regimen_tributario_del_Hidrogeno_verde_en_Chile_ed_rr_hct__2_EDPA.pdf
- HIF. (2021). *HIG Global*. Obtenido de <https://es.hifglobal.com/haru-oni>
- HNH Energy. (2024). *HNH Energy*. Obtenido de <https://www.hnhenergy.com/el-proyecto/>
- Ibarra, V. (12 de Noviembre de 2024). Grupo Luksic pone en operación la primera locomotora propulsada con hidrógeno de Sudamérica. *Diario Financiero*.
- Iberdrola. (s.f.). *Iberdrola.com*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/sustainability/what-is-photovoltaic-energy>

- International Energy Agency. (2023). *Global hydrogen review 2023. International Energy Agency*. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>
- International Energy Agency. (2024). *Global Hydrogen Review 2024*.
- IRENA. (2024). *IRENA International Renewable Energy Agency*. Obtenido de <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Wind-energy>
- MAE. (2023). *mae-energy*. Obtenido de <https://mae-energy.com/proyecto-volta/>
- Ministerio de Energía. (21 de 12 de 2023). Obtenido de <https://energia.gob.cl/noticias/nacional/subsecretaria-de-energia-y-grupo-de-universidades-firma-convenio-y-crea-centro-para-descentralizar-iniciativas-de-energias-renovables-e-hidrogeno-verde>
- Ministerio de Energía. (2024). *Explorador de hidrógeno verde*. Obtenido de <https://hidrogenoverde.minenergia.cl/explorador/>
- Ministerio de Energía. (3 de Septiembre de 2024). *Ministerio de Energía*. Obtenido de <https://energia.gob.cl/noticias/nacional/chile-y-francia-firman-declaracion-para-cooperacion-en-formacion-tecnica-y-profesional-para-desarrollo-del-hidrogeno-verde#:~:text=Tras%20una%20serie%20de%20iniciativas,de%20la%20industria%20del%20hidr%C3%B3geno.>
- Ministerio de Energía de Chile. (2023). *Medidas de impulso al Plan de Acción de Hidrógeno Verde 2023-2030*. Obtenido de <https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/documento-medidas-de-impulso-h2v.pdf>
- Ministerio de Relaciones Exteriores. (2023). *Chile en el exterior*. Obtenido de <https://www.chile.gob.cl/berlin/noticias/chile-firma-acuerdo-con-el-puerto-mas-grande-de-alemania-para-exportar>
- Ministerio de Relaciones Exteriores. (2023). *Chile en el exterior*. Obtenido de <https://www.chile.gob.cl/malasia/noticias/delegacion-de-chile-participa-en-foro-internacional-sobre-hidrogeno>
- Ministerio de Relaciones Exteriores. (23 de 10 de 2023). *ProChile*. Obtenido de <https://www.prochile.gob.cl/noticias-old/detalle-noticia/2023/10/23/avanza-la-relaci%C3%B3n-con-pa%C3%ADses-bajos-para-construir-un-corredor-de-exportaci%C3%B3n-de-hidr%C3%B3geno-verde-entre-chile-y-europa#:~:text=Los%20Pa%C3%ADses%20Bajos%20y%20Chile,pri>
- Minsiterio de Relaciones Exteriores. (2019). *Chile en el exterior*. Obtenido de <https://www.chile.gob.cl/alemania/noticias/chile-y-alemania-firman-acuerdo-para-impulsar-el-hidrogeno-verde>

Ovejero Noticias . (mayo de 2024). *Ovejero Noticias*. Obtenido de <https://www.ovejeronoticias.cl/2024/05/e-combustibles-de-hif-global-llegan-a-italia-para-la-porsche-mobil-1-supercup/>

Statista. (2020). *Statista*. Obtenido de <https://www.statista.com/statistics/760001/global-hydrogen-demand-by-sector-sustainable-scenario/>

U.S. Energy Information Administration. (Abril de 2024). *eia*. Obtenido de <https://www.eia.gov/energyexplained/solar/solar-thermal-power-plants.php#:~:text=Solar%20thermal%2Delectric%20power%20systems,focus%20sunlight%20onto%20a%20receiver>

Zachary Hurwitz, N. B. (6 de Junio de 2023). *BID*. Obtenido de <https://blogs.iadb.org/sostenibilidad/es/aspectos-clave-para-gestionar-los-riesgos-ambientales-y-sociales-del-hidrogeno-verde/#:~:text=Uno%20de%20los%20principales%20riesgos,podr%C3%ADa%20agravar%20la%20escasez%20existente.>

ANEXOS

Anexo 1. Entrevista a director general del proyecto HNH Energy, Mario Marchese.

Austria Energy es un promotor de proyectos de energías renovables y una vez que consigue los permisos y está todo listo para construir, vende a terceros. ¿Es así?

-Si. Existe un pacto de accionistas que contempla que, una vez tomada la decisión de llevar adelante la construcción del proyecto, CIP se queda con el 100%, ya que le compra sus participaciones a Austria Energy y Okowind. Las condiciones para que ello ocurra son tener los permisos ambientales, cerrado el financiamiento y los contratos de venta de amoníaco por un porcentaje de la producción.

¿Cómo se financian USS11 mil millones para un proyecto en el que actualmente no hay compradores?

- Con créditos bancarios, aportes de agencia crediticias y capital propio. Es un financiamiento bajo el mecanismo de project finance, es decir, los préstamos se pagan con los flujos del proyecto a 15 o 20 años plazo. Y el respaldo de la deuda lo pone el dueño (CIP). Antes, el banco evalúa y se asegura que la producción es factible y que hay contratos de venta. Nosotros tenemos que demostrar a los bancos que hay compradores.

En 2030, cuando HNH planea iniciar su producción ¿va a haber un mercado para el amoníaco verde?

- Como lo vemos hoy en día, sí. Hemos estado en conversaciones con potenciales compradores, empresas generadoras y navieras, para darles suministro en 2030. Esta es una industria totalmente nueva, porque como combustible amoniaco no se usa. ¿Qué es primero: el huevo o la gallina? No compro porque no hay. Y no hay porque nadie me compra, pero países como Japón, Corea y Europa, han hecho compromisos de descarbonización.

¿Y en qué traducen esos compromisos?

- En contratos y compromisos de compra de hidrógeno y amoníaco verdes. Este es un combustible que bota vapor de agua que no contamina y óxidos de

nitrógeno que son tratados y capturados. Al desglosar la inversión explica que cerca de un 30% será destinada al parque eólico que, en una primera etapa, tendrá 194 aerogeneradores y en régimen producirá 1.200 MW, el doble del parque eólico de Colbún, el más grande de Sudamérica. Otro 30% irá a financiar la planta de proceso de electrolización que transforma agua en amoníaco, alrededor de un 15% en tubos y cañerías, un 4% a la construcción del puerto y 1 o 2% para la planta de saladora.