



INSTITUTO DE INGENIEROS
CHILE



Escenarios de futuro de la **Industria de Hidrógeno Verde**

H₂



Fotografía: Nuno Marques en unsplash.

INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

Fundado en 1888

Miembro de la American Society of Civil Engineers (ASCE)

JUNTA EJECUTIVA

Presidente

Juan Carlos Barros Monge

Primer Vicepresidente

Ricardo Nicolau del Roure G.

Segunda Vicepresidenta

Ximena Vargas Mesa

Secretario

Germán Millán Valdés

Prosecretario

Mauro Grossi Pasche

Tesorero

Jorge Pedrals Guerrero

Protesorero

Javier García Monge

DIRECTORIO 2025

Alejandra Acuña Villalobos

Elías Arze Cyr

Marcial Baeza Setz

Juan Carlos Barros Monge

Alex Chechilnitzky Zwicky

Silvana Cominetti Cotti-Cometti

Pablo Daud Miranda

Rodrigo Fernández Aguilera

Álvaro Fischer Abeliuk

Roberto Fuenzalida González

Javier García Monge

Jorge Gironás León

Mauro Grossi Pasche

Cristian Hermansen Rebolledo

Viviana Meruane Naranjo

Germán Millán Valdés

Ricardo Nanjarí Román

Luis Nario Matus

Ricardo Nicolau del Roure G.

José Orlandini Robert

Verónica Patiño Sánchez

Jorge Pedrals Guerrero

Humberto Peña Torrealba

Daniela Pollak Aguiló

Miguel Ropert Dokmanovic

Mauricio Sarrazín Arellano

Alejandro Steiner Tichauer

Ximena Vargas Mesa

Scarlett Vásquez Paulus

Jorge Yutronic Fernández

Secretario General

Carlos Gauthier Thomas

SOCIEDADES ACADÉMICAS MIEMBROS DEL INSTITUTO

ASOCIACIÓN CHILENA DE SISMOLOGÍA E INGENIERÍA ANTISÍSMICA, ACHISINA.

Presidente: Mario Lafontaine T.

ASOCIACIÓN INTERAMERICANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL – CAPÍTULO CHILENO, AIDIS.

Presidente: Alexander Chechilnitzky Z.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA, SOCHID.

Presidente: Jorge Gironás L.

SOCIEDAD CHILENA DE GEOTECNIA, SOCHIGE.

Presidente: Paulo Oróstegui T.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA DE TRANSPORTE, SOCHITRAN.

Presidenta: Camila Balbontín T.

SOCIEDAD CHILENA DE EDUCACIÓN EN INGENIERÍA, SOCHEDI.

Presidente: Rodrigo Herrera V.

COMISIONES DEL INSTITUTO

Seguridad Hídrica.

Presidenta: Ximena Vargas M.

Infraestructura Digital para el Siglo XXI.

Presidente: José Orlandini R.

Encadenamientos Productivos en torno al Hidrógeno Verde en Chile.

Presidente: Cristian Hermansen R.

Desafíos para la Ingeniería en Relación con la Seguridad Alimentaria.

Presidente: Javier García M.

Ingenieros en la Historia Presente.

Presidente: Miguel Ropert D.

Convergencia Biológica Digital.

Presidente: Alejandro Steiner T.

Ingeniería y Seguridad (Ad-hoc).

Presidente: Raúl Manásevich T.

CONSEJO CONSULTIVO

Renato Agurto Colima

Raquel Alfaro Fernandois

Iván Álvarez Valdés

Elías Arze Cyr

Dante Bacigalupo Marió

Marcial Baeza Setz

Juan Carlos Barros Monge

Bruno Behn Theune

Sergio Bitar Chacra

Francisco Brieva Rodríguez

Mateo Budinich Diez

Juan Enrique Castro Cannobbio

Alex Chechilnitzky Zwicky

Silvana Cominetti Cotti-Cometti

Raúl Demangel Castro

Álvaro Fischer Abeliuk

Eduardo Frei Ruiz-Tagle

Roberto Fuenzalida González

Alejandro Gómez Arenal

Tomás Guendelman Bedrack

Diego Hernández Cabrera

Jaime Illanes Piedrabuena

Sergio Lavanchy Merino

Nicolás Majluf Sapag

Jorge Mardones Acevedo

Carlos Mercado Herreros

Rodrigo Muñoz Pereira

Ricardo Nanjarí Román

Luis Nario Matus

Andrés Navarro Haeussler

Ricardo Nicolau del Roure G.

Guillermo Noguera Larraín

Humberto Peña Torrealba

Luis Pinilla Bañados

José Rodríguez Pérez

Rodolfo Saragoni Huerta

Mauricio Sarrazín Arellano

Alejandro Steiner Tichauer

Raúl Uribe Sawada

Luis Valenzuela Palomo

Ximena Vargas Mesa

Andrés Weintraub Pohorille

Jorge Yutronic Fernández



INSTITUTO DE INGENIEROS
C H I L E

Escenarios de futuro de la **Industria de Hidrógeno Verde**

PRESIDENTE

Jorge Yutronic Fernández

PARTICIPANTES

Juan Carlos Barros Monge
Sergio Bitar Chacra
Raúl Ciudad de la Cruz
Felisa Córdova González
Thierry de Saint Pierre Sarrut
Yadran Eterovic Solano
Víctor Grimblatt Hinzpeter
Cristian Hermansen Rebolledo
José Orlandini Robert
Alfredo Piquer Gardner
Javier Ruiz del Solar San Martín
Rodolfo Saragoni Huerta

COMITÉ EDITORIAL

Jorge Yutronic F.
Thierry de Saint Pierre S.
Juan Carlos Barros M.
Yadran Eterovic S.
Felisa Córdova G.

EDITOR PRINCIPAL

Cristian Hermansen R.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	6
PRÓLOGO	7
INTRODUCCIÓN	9
1. Contexto actual y tendencias	12
1.1. La industria del H2V como parte de la transformación mayor hacia la descarbonización	13
1.1.1. Contexto actual y tendencias globales	13
1.1.2. Inversiones y proyectos	14
1.1.3. Empresas que comercializan el hidrógeno verde a nivel global	16
1.2. Demanda creciente	18
1.3. Inversiones	20
1.4. Avances en Chile y contexto actual	21
2. Impulsores del desarrollo de la industria	27
2.1. Política de Estado de Hidrógeno en Chile	27
2.2. Dimensión tecnológica	31
2.3. Dimensión económica y de mercados	32
2.3.1. Fabricación de hidrógeno verde	32
2.3.2. Exportación	37
2.3.3. Demanda interna	39

3. Desafíos, brechas y oportunidades globales y en Chile	43
3.1. Desafíos y brechas	43
3.1.1. Infraestructura compartida	44
3.1.2. Legislaciones sectoriales	46
3.1.3. Exportación de hidrógeno verde y sus derivados	48
3.1.4. Demanda interna	49
3.1.5. Transporte marítimo	50
3.2. Oportunidades	50
3.2.1. Gran potencial de energías renovables de bajo costo	51
3.2.2. Disponibilidad de agua de mar y de plantas desaladoras	52
3.2.3. Economía abierta	52
3.2.4. Yacimientos de hierro y cobre para fabricar minerales verdes	53
3.2.5. Continuidad y profundización de políticas públicas	53
3.2.6. Formación y reconversión de capital humano	53
3.2.7. Corredores marítimos verdes	54
3.2.8. Exportación de tecnología, ingeniería y movilidad de recursos humanos	54
4. Prospectiva Industria del Hidrógeno Verde	55
4.1. Escenario de Desarrollo Acelerado	61
4.1.1. Dimensión económica	62
4.1.2. Dimensión de competencia de H2V con combustibles fósiles y otras opciones	63
4.1.3. Dimensión infraestructura integral	64
4.1.4. Dimensión tecnológica	65
4.1.5. Dimensión de regulaciones y políticas activas	66
4.1.6. Dimensión de capital humano	66
4.1.7. Ámbito de prospectiva: industria del H2V en Chile	67
4.1.8. Ámbito / dimensión de prospectiva de ingeniería originada en Chile y asociada a la industria del H2V	68
4.2. Escenario de Desarrollo Moderado	69
4.2.1. Dimensión económica	69
4.2.2. Dimensión de competencia de H2V con combustibles fósiles y otras opciones	71
4.2.3. Dimensión infraestructura básica	71

4.2.4. Dimensión tecnológica	72
4.2.5. Dimensión de regulaciones y políticas públicas	73
4.2.6. Dimensión capital humano	73
4.2.7. Ámbito de prospectiva: industria del H2V en Chile	74
4.2.8. Ámbito/dimensión de prospectiva de ingeniería originada Chile y asociada a la industria del H2V	75
4.3. Comparación de escenarios	76
 5. Dimensiones relevantes de prospectiva de la industria del hidrógeno verde en Chile	 79
5.1. Línea de base para la prospectiva	79
5.2. Escenario de Desarrollo Acelerado	82
5.2.1. Dimensión económica	83
5.2.2. Dimensión de competencia de H2V con combustibles fósiles y otras opciones	84
5.2.3. Dimensión infraestructura integral	85
5.2.4. Dimensión tecnológica	86
5.2.5. Dimensión de regulación y políticas activas	86
5.2.6. Ámbito/dimensión de prospectiva de ingeniería originada en Chile y asociada a la industrial del H2V	87
5.3. Escenario de Desarrollo Moderado	88
5.3.1. Dimensión económica	89
5.3.2. Dimensión de competencia de H2V con combustibles fósiles y otras opciones	91
5.3.3. Dimensión infraestructura básica	91
5.3.4. Dimensión tecnológica	92
5.3.5. Dimensión de regulaciones y políticas públicas	93
5.3.6. Ámbito/dimensión de prospectiva de ingeniería originada en Chile y asociada a la industrial del H2V	94
5.4. Dimensión capital humano	95
5.5. Resumen Escenarios	98
5.5.1. Resumen Escenario de Desarrollo Acelerado	98
5.5.2. Resumen Escenario Desarrollo Moderado	99

6. Conclusiones	101
Escenarios de futuro: entre lo global y lo nacional	101
Valor de la prospectiva a 10 años	103
Factores relevantes de la prospectiva de iH2V en Chile	103
Conclusión general	104
Conclusiones específicas	105

AGRADECIMIENTOS

El Instituto de Ingenieros de Chile agradece la dedicación y compromiso de los participantes de la Comisión presidida por Jorge Yutronic e integrada por: Juan Carlos Barros, Sergio Bitar, Raúl Ciudad, Felisa Córdova, Yadran Eterovic, Víctor Grimblatt, Cristian Hermansen, Thierry de Saint Pierre, José Orlandini, Alfredo Piquer, Javier Ruiz del Solar y Rodolfo Saragoni, quienes han aportado sus visiones, conocimientos y experiencias profesionales para tratar este relevante tema.

Se hace extensivo estos agradecimientos a quienes integraron el Comité editorial del presente informe: Jorge Yutronic, Juan Carlos Barros, Felisa Córdova, Thierry de Saint Pierre, Yadran Eterovic y a Cristian Hermansen su Editor principal.

A su vez, un especial reconocimiento a la Sra. Ximena Vargas y al Sr. Javier García, editores respectivamente de los Anales de Ingeniería y de la Revista Chilena de Ingeniería, quienes, en su calidad de editores de las publicaciones de nuestra Corporación, colaboraron en la revisión del material que integra este Informe.

PRÓLOGO

La prospectiva ya se ha transformado en una disciplina. Si bien ya conocida hace años en el mundo desarrollado, crecientemente ha sido incorporada en el análisis estratégico —en particular de escenarios futuros—, en países latinoamericanos y Chile no ha sido la excepción. Una de sus manifestaciones más claras es el proyecto de ley que amplía el quehacer del Consejo Nacional de Innovación para la Competitividad al incorporar las actividades de prospectiva como una de sus herramientas principales para analizar, comprender y sobre todo orientar el esfuerzo que en materias de ciencia, tecnología, innovación y desarrollo productivo, deba realizar el país.

De igual manera el Instituto de Ingenieros de Chile también ha incorporado este marco de análisis en el desarrollo de su misión como entidad. La creación y funcionamiento de la Comisión de Prospectivas de Ingeniería (CPI) del Instituto reflejan ese interés el cual se condice como la misma ingeniería opera para sacar adelante grandes y complejos proyectos.

En este documento se resume un gran trabajo de prospectiva realizado por un connotado grupo de ingenieros chilenos sobre un sector que a todas luces representa una enorme oportunidad de generación de conocimiento, valor económico, social y ambiental para Chile y el mundo: la industria del Hidrógeno Verde. Tal como se señala en el documento, el país posee una enorme ventaja comparativa para ser líder en esta industria basada en la posibilidad de generar energía limpia a los costos marginales más bajos del planeta. Pero también posee otra ventaja comparativa. Chile cuenta con el espacio geográfico suficiente para instalar la infraestructura necesaria para que esta ventaja en costos pueda manifestarse.

En el documento se revisa y plantea —siguiendo la metodología de prospectivas—, la forma en que estas ventajas comparativas puedan transformarse en ventajas competitivas. Y en función de esos posibles estados futuros, se sugieren acciones, decisiones y responsabilidades necesarias para lograrlo. El texto es extenso y muy completo sobre dichas medidas, abarcando no solo aquellos aspectos que están directamente relacionados con la producción de este energético sino también sobre lo necesario para generar los encadenamientos productivos tanto “aguas arriba” como “aguas abajo”, logrando que esta industria se transforme efectivamente

en un polo de desarrollo tecnológico y económico para el país. De igual modo, el texto enfatiza una mirada dinámica del desarrollo de esta industria mostrando las diferentes etapas que debe transitar el proceso e ilustrando las diferentes conexiones que deben existir con otros sectores económicos y productivos. Entre éstos, la infraestructura portuaria, vial, eléctrica, la formación de talento necesarios para las etapas de construcción y operación de las plantas, necesidades científicas y tecnológicas, por ejemplo, en aplicaciones de captura de CO₂ del aire o nuevos materiales para equipos claves del proceso productivo, en incluso con otros sectores pujantes de nuestra economía como el Litio para baterías de acumulación y Cobre. Las conclusiones y sugerencias que se presentan en el texto son el resultado natural y consistente de dicho análisis dinámico y prospectivo.

Este trabajo viene a reforzar lo que hoy pensamos debería ser una estrategia de largo plazo, al convertir a la industria del Hidrógeno Verde en una de las principales fuentes de crecimiento y mejora económico, social y ambiental para el país. Este objetivo, y tal como se sugiere en el texto, resulta del trabajo colaborativo de muchas instituciones y personas, en especial entre el mundo público y el mundo privado. Desde la Corfo hemos llevado adelante un sinnúmero de medidas tanto de coordinación al crear el comité CORFO de Hidrógeno Verde compuesto por once ministerios junto a representantes del sector privado, sino también un amplio conjunto de medidas concretas muchas de ellas contenidas dentro del Plan de Acción de Hidrógeno Verde 2023-2030.

La industria del Hidrógeno Verde representa sin duda una alternativa fehaciente de prosperidad para el país. Este documento que nos entrega el Instituto de Ingenieros de Chile, es una fuente muy valiosa de información sobre lo que debemos hacer para que esta promesa de bienestar se transforme en una realidad.

PHD JOSÉ MIGUEL BENAVENTE
Vicepresidente Ejecutivo de CORFO

INTRODUCCIÓN

La CPI¹ del Instituto de Ingenieros de Chile decidió abordar una complementación y profundización de la prospectiva presentada en el libro publicado² en 2023. Esta vez con foco en la Industria del Hidrógeno Verde (iH2V) debido a su importancia en la descarbonización y el desarrollo sostenible, tanto a escala nacional como internacional.

Las elaboraciones de prospectiva focalizadas en la iH2V se consideran en el período hasta 2035, en dos escenarios:

Escenario de desarrollo moderado: basado principalmente en mejoramiento de las políticas públicas, desarrollo de mercados y dinámicas de inversión existentes.

Escenario de desarrollo acelerado: basado principalmente en enfoques disruptivos de políticas públicas, innovaciones tecnológicas e inversiones que aceleran el desarrollo competitivo de los mercados.

La metodología de prospectiva es la misma descrita en la sección 1.3 del libro publicado sintetizada en la [Figura I.1](#).

Diferentes concepciones de la iH2V están evolucionando a escala internacional dependiendo de las industrias impactadas, las políticas económicas de cada país, las dinámicas de inversiones, la investigación y la tecnología. En particular sobre su potencial de valor y la competencia con otras industrias.

En este informe se considera la iH2V en forma amplia.

¹ CPI: Comisión de Prospectiva de Ingeniería del Instituto de Ingenieros de Chile.

² “Prospectiva de la Ingeniería Chilena. Transformación Digital e Industria 4.0. Instituto de Ingenieros de Chile” publicado en agosto de 2023 con colaboración de USM.



Figura I.1. Metodología de prospectiva

Fuente: Adaptación del modelo generado por Joseph Voros y presentado en su trabajo “A generic foresight process framework”. Joseph Voros, Faculty of Business and Enterprise, Swinburne University of Technology, Australia. Foresight, vol.5, no.3, pp.10-21, 2003. ISSN: 1463-6689.

Los sectores y tecnologías considerados en la prospectiva son los mismos ya señalados en el libro referido, que se representan en la [Figura I.2.](#)

Sectores y Tecnologías consideradas			
Energía	Minería	Transporte	Agroindustria y alimentos
Salud	Educación en Ingeniería	Ciudades inteligentes	Ciudades sísmicamente resilientes
Manufactura	Economía digital	Infraestructura digital	Estado digital
Inteligencia artificial – Analítica avanzada	Realidad virtual – Realidad aumentada	Simuladores – Manufactura aditiva	Internet de las cosas
Computación de alto desempeño	Blockchain	Servicios cloud avanzados	Vehículos autónomos
Robótica	Plataformas digitales	Computación cuántica	Comunicaciones 5G

Figura I.2. Sectores y tecnologías consideradas

La iH2V se articula con una variedad de tecnologías de Industria 4.0 (i4.0), acelerando y aumentando sus efectos sobre los mercados, otras industrias, las comunidades, la infraestructura en los territorios, los organismos públicos, las instituciones educacionales y otros actores, así como en la vida de las personas y la sociedad en su conjunto.

En este informe de prospectiva de iH2V se presenta primero la caracterización de la industria actual, luego los escenarios de futuro a escala internacional en forma separada y también en un modo comparativo. El informe termina con un planteamiento de los escenarios de futuro prospectados para Chile, así como un conjunto de conclusiones.

La redacción de este documento —como otros informes del Instituto de Ingenieros de Chile— valora la independencia de los lectores para darle el uso que estimen conveniente a los resultados de la prospectiva. Por lo que no se incluyen recomendaciones específicas ni planes de acción asociados.

La iH2V es una industria nueva, por lo tanto, sigue los procesos de crecimiento que otras industrias han registrado en el pasado, con etapas iniciales de gran entusiasmo, seguida de una etapa de depresión, para finalmente alcanzar una aproximación realista de su utilización y producción.

La industria del hidrógeno verde incluye a sus principales derivados como amoníaco verde, metanol verde y combustibles sintéticos, además de hidrógeno verde. La evolución de cada tipo sigue las tendencias de las aplicaciones en el mercado mundial, de sus costos de producción y de los costos de transporte.

1

Contexto actual y tendencias

El hidrógeno verde es una denominación de hidrógeno que se utiliza cuando se produce con fuentes de energía renovable, como la energía solar, eólica o hidroeléctrica, para lograr la electrólisis del agua. Este proceso separa las moléculas de agua en oxígeno e hidrógeno, sin emitir dióxido de carbono ni otros gases de efecto invernadero. La demanda de hidrógeno verde crece, dada su contribución a la descarbonización de sectores industriales, posicionándose como un actor relevante en la transición hacia una economía global descarbonizada para mitigar el cambio climático. Su uso se sitúa en el transporte, principalmente marítimo y en la industria del acero y fertilizantes, donde puede reemplazar combustibles fósiles³.

Los países, las empresas y otros organismos que buscan reducir su huella de carbono están aumentando su interés en el hidrógeno verde, como parte de su horizonte 2030. En este contexto, se presenta la prospectiva hacia el año 2035 de la industria del hidrógeno verde, considerando diversos factores y dimensiones relevantes que están impulsando esta demanda, entre ellos⁴:

- **Transporte.** El hidrógeno verde puede utilizarse como combustible en vehículos eléctricos de pila de combustible, ofreciendo una alternativa limpia a los combustibles fósiles tradicionales, como en el transporte marítimo con varios barcos en pruebas.
- **Industria.** Sectores como el acero, el cemento y la química, que requieren altas temperaturas y grandes cantidades de energía, están explorando el hidrógeno verde para reducir sus emisiones de carbono.

³ Alvarado, J. A., & Sánchez, D. A. (2020). Hidrógeno verde: Oportunidades y retos en la transición energética global. *Energía y Desarrollo*, 12(1), 45-60. <https://doi.org/10.1016/j.enerdev.2020.01.007> Rodríguez, M., & Gutiérrez, F. (2021). El rol del hidrógeno verde en la descarbonización de la industria y el transporte. *Journal of Renewable Energy and Environmental Science*, 9(4), 121-134. <https://doi.org/10.1016/j.jreensci.2021.06.003>

⁴ Gómez, P., & Fernández, J. M. (2022). La prospectiva del hidrógeno verde hacia 2035: Impulsores clave y tendencias globales en la transición energética. *Journal of Sustainable Energy*, 15(3), 78-92. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2022.03.009>

- **Políticas y Regulaciones.** El apoyo gubernamental, las políticas de reducción de carbono y los compromisos internacionales para combatir el cambio climático están fomentando el desarrollo y la adopción del hidrógeno verde.
- **Inversión y Tecnología.** El avance en tecnologías de electrólisis y la reducción de costos están haciendo que la producción de hidrógeno verde sea más competitiva económicamente.

Los aspectos mencionados están contribuyendo al aumento de la inversión y desarrollo de proyectos piloto e infraestructuras necesarias para la producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno verde a gran escala.

1.1. La industria del H2V como parte de la transformación mayor hacia la descarbonización

Forman parte de esta transformación la electromovilidad, la industria del litio, la electricidad basada en fuentes renovables y otras (cobre “verde”, etc.). Estas industrias evolucionarán al ir demostrando mayor viabilidad y efectividad que otras en algunos ámbitos, en especial, con respecto de la industria de los combustibles fósiles, gas y otras. Adicionalmente, habrá articulación del hidrógeno verde con hidrógenos azul y gris⁵.

1.1.1. Contexto actual y tendencias globales

- **Descarbonización de sectores clave:** industria pesada (minería, acero, cemento) y transporte de larga distancia (camiones, barcos, aviones) necesitan soluciones de descarbonización y el hidrógeno verde se presenta como una opción viable⁶.

⁵ **Hidrógeno Gris:** se obtiene del gas natural mediante reformado con vapor, liberando CO₂ a la atmósfera. **Hidrógeno Azul:** similar al gris, pero con la adición de tecnologías para capturar y almacenar el CO₂ producido durante el proceso.

Hidrógeno Negro o Marrón: producido por la gasificación de carbón, utilizando combustibles que liberan CO₂.

Hidrógeno Verde: se produce mediante electrólisis del agua utilizando electricidad de fuentes renovables como solar o eólica, resultando en una producción libre de emisiones de CO₂.

Hidrógeno Rosa: se produce mediante electrólisis del agua utilizando electricidad de plantas nucleares.

Hidrógeno Turquesa: se produce a través de metano pirólisis, donde el gas natural se descompone en hidrógeno y carbono sólido, evitando la liberación de CO₂.

Hidrógeno Blanco: es el hidrógeno que se encuentra de forma natural en el subsuelo y puede ser extraído directamente.

⁶ Zeng, Y., & Liu, G. (2021). Decarbonizing heavy industries and long-distance transport with green hydrogen: Challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 296, 126517. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126517>

- **Crecimiento del mercado:** se espera que el mercado del hidrógeno verde crezca en las próximas décadas. Un informe de la IEA discute el potencial de crecimiento del mercado del hidrógeno verde a nivel global, proyectando un aumento significativo en la demanda para 2050, lo que refleja la relevancia de este combustible dentro de la transición energética y su integración en el mix energético mundial⁷.
- **Precios y competitividad:** actualmente el hidrógeno verde es más caro que el hidrógeno producido a partir de fuentes fósiles (hidrógeno gris). Por su parte el hidrógeno fósil con captura de carbono (hidrógeno azul) está avanzando en Europa. Se espera que los costos disminuyan con el tiempo debido a avances tecnológicos, economías de escala y expansión de la infraestructura, según un informe de McKinsey⁸.
- **Políticas y compromisos climáticos:** países, empresas y organizaciones están estableciendo objetivos ambiciosos de reducción de emisiones, destacadas por el informe de REN21⁹, que analiza cómo los compromisos climáticos y las políticas públicas de reducción de emisiones están impulsando el uso de tecnologías renovables, incluido el hidrógeno verde, como parte de la transición energética global para alcanzar metas de emisiones netas cero y promover soluciones tecnológicas más sostenibles.
- **Políticas y regulaciones favorables:** están acelerando el desarrollo del mercado, tal como lo plantea el Hidrogen Council europeo, que aborda como muchos gobiernos están implementando subsidios, incentivos y créditos fiscales y objetivos de descarbonización que favorecen el hidrógeno verde¹⁰.

1.1.2. Inversiones y proyectos

- **Inversiones tecnológicas:** se percibe un desarrollo futuro de las inversiones públicas y privadas en tecnologías de electrólisis, infraestructuras de transporte y almacenamiento de hidrógeno, así como en proyectos de energías renovables con producción de hidrógeno verde. Hoy se cuenta con Megaproyectos y Hubs de Hidrógeno y se están desarrollando proyectos a gran escala en regiones con abundantes recursos renovables y que concentran producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno, integradas con industrias y transporte¹¹.

⁷ IEA (International Energy Agency). (2021). The future of hydrogen: Seizing today's opportunities. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>

⁸ McKinsey & Company. (2020). A path to hydrogen competitiveness: A cost perspective. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/a-path-to-hydrogen-competitiveness-a-cost-perspective>

⁹ REN21 (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century). (2021). Renewables 2021 global status report. REN21. <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>

¹⁰ Hydrogen Council. (2021). The hydrogen roadmap Europe: A sustainable pathway for the European energy transition. Hydrogen Council. <https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-roadmap-europe/>

¹¹ Global Green Hydrogen Partnership. (2023). Collaborative frameworks for global hydrogen adoption. GGHP. <https://gghp.org>

- **Inversiones en I+D+i:** empresas y gobiernos están invirtiendo en investigación y desarrollo e innovación para mejorar la eficiencia y la efectividad de las tecnologías y reducir los costos de producción, almacenamiento y transporte de hidrógeno verde; el informe de Bloomberg¹², analiza las tendencias de inversión en la economía del hidrógeno, destacando los proyectos clave a nivel mundial, las aplicaciones diversificadas en múltiples sectores, proyectando el crecimiento de las inversiones.
- **En Infraestructura:** el desarrollo de la infraestructura para el hidrógeno (tuberías, estaciones de recarga, plantas de producción) es crucial para la expansión del mercado. IRENA destaca los proyectos piloto y colaboraciones internacionales que ayudan a establecer esta infraestructura en diversas regiones en el mundo¹³.
- **Incentivos y Subsidios:** el Foro Económico Mundial proporciona un análisis de los marcos regulatorios y las políticas públicas que están impulsando los proyectos de hidrógeno verde¹⁴.

Países líderes en producción de Hidrógeno verde

Varios países están emergiendo como líderes en la producción de hidrógeno verde, impulsados por políticas de energías limpias y renovables y tecnologías avanzadas, entre ellos:

- **Alemania:** es uno de los líderes europeos en la producción de hidrógeno verde, con inversiones significativas en tecnologías de electrólisis alimentadas por energía renovable. Iniciativas como la “National Hydrogen Strategy”¹⁵ contemplan inversiones públicas de hasta 9 mil millones de euros para apoyar el desarrollo del hidrógeno.
- **Australia:** con su abundante potencial para energías renovables, especialmente solar y eólica, Australia se está posicionando como un importante productor de hidrógeno verde.
- **Japón:** como importador neto de energía, Japón está apostando fuertemente por el hidrógeno verde para reducir su dependencia de los combustibles fósiles y como parte de su estrategia de energía limpia.
- **Países Bajos:** está desarrollando proyectos significativos de hidrógeno verde impulsados por la energía eólica en el Mar del Norte, con el objetivo de convertirse en un exportador de hidrógeno hacia el continente europeo.

¹² BNEF (Bloomberg New Energy Finance). (2021). Hydrogen economy outlook: Investment and project trends in 2021. Bloomberg New Energy Finance. <https://about.bnef.com>

¹³ International Renewable Energy Agency. (2020). Green hydrogen: A guide to policy making. IRENA. <https://www.irena.org/publications>

¹⁴ World Economic Forum. (2020). The hydrogen revolution: A framework for fostering investments. World Economic Forum. <https://www.weforum.org/reports/the-hydrogen-revolution>

¹⁵ European Clean Hydrogen Alliance. (2020). Strategic priorities for hydrogen deployment in Europe. European Commission. <https://ec.europa.eu/growth/industry/sustainability/european-clean-hydrogen-alliance>

- **Noruega:** utilizando su experiencia en energía hidroeléctrica, está explorando la producción de hidrógeno verde como parte de su transición energética hacia una economía más sostenible.
- **China:** ha consolidado su posición como líder mundial en la producción y desarrollo de electrolizadores de 150 MW, alimentados por plantas solares de 200 MW en la generación de hidrógeno verde. Está desarrollando nuevos electrodos para electrolizadores, mejorando su eficiencia y estabilidad y sus precios pueden ser hasta tres veces menores que en Estados Unidos. Según la Agencia Internacional de la Energía (AIE), se estima que, para finales de 2023, China controlará aproximadamente el 50% de la capacidad instalada de electrolizadores de hidrógeno bajo en carbono a nivel mundial, alcanzando alrededor de 1.2 gigavatios.

Estos países están invirtiendo en infraestructura y tecnología o han decidido invertir en ella, para convertirse en líderes en la producción y exportación de hidrógeno verde, contribuyendo así a la reducción de las emisiones globales de gases de efecto invernadero y al impulso de una economía más limpia y sostenible.

1.1.3. Empresas que comercializan el hidrógeno verde a nivel global

En el ámbito de la comercialización de hidrógeno verde, algunas de las principales empresas internacionales involucradas se presentan a continuación, junto a sus actividades principales.

- Air Liquide (empresa global). Líder en gases industriales y servicios relacionados. Trabaja en varios proyectos para desarrollar cadenas de suministro de hidrógeno verde.
- Linde (empresa global). Está invirtiendo en la producción y comercialización de hidrógeno verde, desarrollando proyectos en diferentes partes del mundo utilizando energía renovable en la producción de hidrógeno.
- AIR Liquide (Francia). Participa en proyectos de producción y distribución de hidrógeno verde en Chile, se enfoca en aplicaciones industriales y movilidad sostenible.
- ITM Power (Gran Bretaña). Empresa que se centra en la electrólisis del agua para producir hidrógeno verde, desarrollando electrolizadores y proyectos de infraestructura de hidrógeno.
- ENGIE. Como empresa global de energía, está diversificando su cartera hacia soluciones de hidrógeno verde.
- Siemens Energy (Alemania). Está desarrollando tecnologías para la producción y almacenamiento de hidrógeno verde, así como sistemas de electrólisis y celdas de combustible.

- ThyssenKrupp (Alemania). Una compañía industrial con fuertes inversiones en tecnologías de electrólisis y proyectos de hidrógeno verde. Incursiona en el desarrollo de electrolizadores a gran escala y proyectos de producción de hidrógeno verde para la industria.
- Iberdrola (España). Es una de las principales empresas de energía renovable del mundo, está invirtiendo fuertemente en proyectos de hidrógeno verde. Participa en colaboraciones de proyectos de hidrógeno verde en España, incluyendo plantas de producción y uso industrial.
- Ørsted (Europa). Como empresa líder en energía eólica marina en Europa, está expandiendo sus operaciones para incluir la producción de hidrógeno verde en proyectos de integración de parques eólicos marinos con producción de hidrógeno.
- Plug Power (EE.UU.). Es una empresa que se especializa en sistemas de celdas de combustible y soluciones de hidrógeno verde para aplicaciones industriales y de movilidad.
- Nel ASA (Noruega). Empresa especializada en electrolizadores y estaciones de recarga de hidrógeno, desarrolla proyectos e infraestructuras de hidrógeno verde en Europa.
- Shell (Europa, América del Norte). Está invirtiendo significativamente en energías renovables y tecnologías de hidrógeno verde. Participa en proyectos de producción y estaciones de recarga de hidrógeno en Europa y América del Norte.
- BP (Europa, Australia). Similar a Shell, BP está diversificando su cartera energética para incluir proyectos en Australia y Europa para la producción de hidrógeno verde a gran escala.
- Toyota (Japón). Un líder en tecnología de vehículos de pila de combustible, está promoviendo la adopción de hidrógeno en el sector del transporte con desarrollo y comercialización de vehículos de hidrógeno, como el Toyota Mirai, y colaboración en la infraestructura de recarga.
- Ningxia Baofeng Energy Group (China). Esta empresa opera un electrolizador alcalino de 150 MW, alimentado por una planta solar de 200 MW. Este proyecto es uno de los más grandes del mundo y refleja la capacidad de China para integrar tecnologías de alta potencia en la producción de hidrógeno verde.

Empresas que comercializan el hidrógeno verde en América latina

En América Latina, aunque el desarrollo de la industria de hidrógeno verde está en una etapa inicial en comparación con otras regiones del mundo, algunas empresas y proyectos están empezando a destacar en la comercialización y desarrollo de esta tecnología. Estas empresas están desempeñando un papel crucial en la creación de un ecosistema sostenible de hidrógeno verde, colaborando en proyectos de investigación, desarrollo tecnológico y la construcción de infraestructuras esenciales para el futuro energético. Hay un gran potencial debido a la abundancia de recursos renovables como la energía solar, eólica e hidroeléctrica. Además, los países de la región están comenzando a establecer políticas y regulaciones que fomenten el desarrollo de esta tecnología limpia y sostenible. Se muestran a continuación anuncios de empresas de América latina sin incluir los proyectos en Chile.

- **Yacimientos Petrolíferos Fiscales (YPF, Argentina).** Ha anunciado planes para desarrollar proyectos de hidrógeno verde, utilizando energía renovable como fuente para la producción de hidrógeno.
- **Petrobras (Brasil).** Está investigando y desarrollando tecnologías para la producción de hidrógeno verde, con el objetivo de integrar esta fuente de energía limpia en su cartera.
- **Cemex (México).** Está explorando el uso de hidrógeno verde en sus operaciones, especialmente para reducir las emisiones de carbono en la producción de cemento.

1.2. Demanda creciente

Principales clientes del hidrógeno verde

El hidrógeno verde tiene una variedad de aplicaciones y potenciales clientes en diferentes sectores industriales y de consumo, entre ellas:

- **Industria Química.** Utiliza hidrógeno como materia prima en la producción de amoníaco, metanol y otros productos químicos. El hidrógeno verde se está considerando cada vez más como una alternativa limpia a los métodos tradicionales de producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles.
- **Refinerías y Petroquímica.** Pueden utilizar hidrógeno en procesos de hidrotratamiento para eliminar contaminantes del petróleo crudo y de otros productos refinados. El hidrógeno verde puede contribuir a la reducción de emisiones en estas operaciones.
- **Sector Transporte.** El hidrógeno verde se está considerando como una fuente de energía limpia para vehículos de transporte, especialmente en aplicaciones de transporte pesado como camiones y autobuses, así como para el transporte marítimo y ferroviario.

- **Sector Energético.** El hidrógeno verde puede ser utilizado en celdas de combustible para la generación de electricidad y como almacenamiento de energía en los casos en que no se pueda utilizar almacenamiento en baterías. Esto puede contribuir a la integración de fuentes intermitentes de energía renovable en la red eléctrica.
- **Industria Siderúrgica.** Esta industria utiliza hidrógeno como agente reductor en la fabricación de acero, lo que puede ayudar a reducir las emisiones de CO₂ asociadas con este proceso.
- **Almacenamiento y Distribución de Energía.** El hidrógeno verde también se puede utilizar para almacenar energía a gran escala y para su distribución a áreas donde la infraestructura eléctrica es limitada.
- **Sector Residencial y Comercial.** A medida que se desarrollan tecnologías de pilas de combustible más eficientes y accesibles, el hidrógeno verde podría tener aplicaciones en sistemas de calefacción y generación de electricidad para edificios residenciales y comerciales.

Factores de crecimiento de demanda

- **Descarbonización de sectores que tienen dificultades para la transición:** minería, industrias del acero, del cemento y otras; necesitan soluciones y el hidrógeno verde es una opción posible.
- **Cumplimiento de Objetivos Climáticos Neutralidad de Carbono:** muchas economías están fijando metas de cero emisiones netas, donde el hidrógeno verde juega un papel central.
- **Políticas públicas y acuerdos internacionales:** países y organizaciones han venido estableciendo objetivos relevantes de reducción de emisiones, impulsando la demanda por mejores soluciones (facilitando el desarrollo de diversas industrias y tecnologías, entre ellas de hidrógeno verde). Compromisos como el Acuerdo de París han acelerado la adopción de tecnologías que reducen emisiones.
- **Transporte de Larga Distancia:** aplicaciones como el transporte marítimo y ferroviario están adoptando hidrógeno verde y combustibles derivados como el amoníaco.
- **Creciente Demanda de Productos Derivados:** el amoníaco verde es utilizado como fertilizante, insumo para la fabricación de explosivos o combustible limpio y los combustibles sintéticos son alternativas sostenibles frente al diésel y la gasolina.
- **Estrategias Empresariales:** grandes empresas en sectores como la energía, la automoción y la industria química están incorporando hidrógeno verde para mejorar su sostenibilidad.
- **Cadenas de Suministro Verdes:** los consumidores y reguladores están demandando productos con menores huellas de carbono, incentivando el uso de hidrógeno en la producción.

- **Seguridad Energética:** el hidrógeno verde permite a los países reducir su dependencia de los combustibles fósiles importados, especialmente en un contexto de volatilidad geopolítica.
- **Almacenamiento de Energía:** actúa como un vector energético que puede ser almacenado y transportado en grandes cantidades.
- **Avances Tecnológicos:** reducción de costos y mejoras en la eficiencia de los electrolizadores y nuevos desarrollos en almacenamiento y transporte facilitan la adopción del hidrógeno verde a gran escala.

1.3. Inversiones

Se muestran a continuación algunas de los principales anuncios de inversiones internacionales en Hidrógeno Verde sin incluir los proyectos en Chile.

- **HyDeal Ambition (Europa).** Este proyecto busca producir hidrógeno verde a gran escala en Europa, con una capacidad de electrolizadores que alcanzará los 95 GW para 2030, con una inversión cercana a 100.000 millones de euros.
- **Proyecto NEOM (Arabia Saudita).** Contempla el desarrollo de una planta de hidrógeno verde en la ciudad futurista de NEOM, con una capacidad de producción de 650 toneladas diarias de hidrógeno. Inversión estimada: cerca de 5.000 millones de dólares.
- **Proyecto Asian Renewable Energy Hub (Australia).** Iniciativa para producir hidrógeno verde utilizando energía eólica y solar en Australia Occidental, con una capacidad de 26 GW. La inversión estimada es alrededor de 36.000 millones de dólares.
- **Proyecto NorthH2 (Países Bajos).** Desarrollo de una cadena de suministro de hidrógeno verde que incluye producción, almacenamiento y distribución, con una capacidad de 4 GW para 2030, con una inversión estimada de 9.000 millones de euros.
- **Proyecto de Iberdrola y H2 Green Steel (España).** Construcción de una planta de hidrógeno verde para producir acero verde, con una capacidad de 1 GW. Inversión estimada: 2.300 millones de euros.
- **Proyecto Ningxia Baofeng Energy Group (China).** Planta para operar un electrolizador alcalino de 150 MW, alimentado por una planta solar de 200 MW.
- **HyNet (Reino Unido).** Proyecto que combina la producción de hidrógeno verde con la captura y almacenamiento de carbono, enfocándose en descarbonizar la industria y el transporte en el noroeste de Inglaterra.
- **Asian Renewable Energy Hub (Australia).** Proyecto en Australia Occidental que planea generar energía renovable para producir hidrógeno verde destinado a la exportación hacia mercados asiáticos.

- **Hydrogen Energy Supply Chain (Australia).** Iniciativa que busca producir hidrógeno en Australia y transportarlo en forma líquida a Japón, estableciendo una cadena de suministro internacional.
- **HyDeal LA (Estados Unidos).** Proyecto que pretende crear un ecosistema de hidrógeno verde en el área de Los Ángeles, integrando producción, distribución y consumo en sectores como el transporte y la industria.
- **Houston Hydrogen Hub (Estados Unidos).** Iniciativa que busca transformar a Houston en un centro de producción y distribución de hidrógeno verde, aprovechando su infraestructura energética existente.
- **Fukushima Hydrogen Energy Research Field (Japón).** Instalación que produce hidrógeno verde a partir de energía solar, con el objetivo de desarrollar tecnologías y modelos de negocio para su uso en movilidad y generación de energía.
- **Westküste 100 (Alemania).** Proyecto que integra la producción de hidrógeno verde con energía eólica marina, su almacenamiento y uso en la industria y el transporte, promoviendo una economía circular del hidrógeno.

Estos ecosistemas realizan importantes esfuerzos integrales para desarrollar cadenas de valor completas en torno al hidrógeno verde, abarcando desde la generación de energía renovable hasta su aplicación en diversos sectores, y así avanzar hacia una economía descarbonizada.

1.4. Avances en Chile y contexto actual

La visión sobre las oportunidades

Chile se encuentra en una posición privilegiada para liderar la producción y exportación de hidrógeno verde a nivel mundial, gracias a sus abundantes recursos naturales y políticas favorables para su desarrollo. A continuación, se detallan las principales oportunidades en el contexto actual:

- **Energía Solar y Eólica.** El Desierto de Atacama ofrece una de las radiaciones solares más altas del mundo, mientras que la Patagonia cuenta con vientos constantes y fuertes, ideales para la generación de energía eólica. Estos recursos permiten la producción de hidrógeno verde a bajo costo.
- **Mercados Internacionales.** La ubicación geográfica de Chile facilita el acceso a mercados en Asia, Europa y América del Norte, posicionando al país como un proveedor clave de hidrógeno verde y sus derivados.

- **Desarrollo Económico y Empleo. Generación de Empleos Verdes.** La industria del hidrógeno verde tiene el potencial de crear empleos de calidad, contribuyendo al desarrollo económico sostenible y a la diversificación de la matriz productiva nacional.
- **Innovación y Desarrollo Tecnológico, Investigación y Desarrollo.** La implementación de proyectos de hidrógeno verde impulsa la innovación tecnológica y la colaboración entre universidades, centros de investigación y la industria, fortaleciendo el ecosistema de I+D en el país.
- **Reducción de Emisiones.** El hidrógeno verde contribuye a la descarbonización de sectores difíciles de electrificar, alineándose con los compromisos de Chile en materia de cambio climático y sostenibilidad. Estas oportunidades posicionan a Chile como un actor clave en la transición energética global, con el potencial de liderar la producción y exportación de hidrógeno verde, impulsando el desarrollo económico sostenible y la innovación tecnológica en el país.

La política pública y plan de acción

El Gobierno de Chile, principalmente a través del Ministerio de Energía y de CORFO, desempeña un papel relevante en la promoción y desarrollo de la industria del hidrógeno verde, colaborando estrechamente con otros organismos gubernamentales y del sector privado para impulsar esta iniciativa estratégica. En conjunto con otros organismos, lidera una estrategia integral para posicionar a Chile como referente mundial en la producción y exportación de hidrógeno verde, promoviendo el desarrollo económico sostenible y la descarbonización de la economía nacional.

- **Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde.** En noviembre de 2020, el Ministerio de Energía presentó la “Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde”, con el objetivo de posicionar a Chile como líder mundial en la producción y exportación de hidrógeno verde. Esta estrategia establece metas ambiciosas, como producir el hidrógeno verde más barato del planeta para 2030 y estar entre los tres principales exportadores para 2040.
- **Comité Hidrógeno Verde.** En junio de 2022 se crea el Comité CORFO para el desarrollo sustentable de la industria de hidrógeno verde, integrado por 11 ministros, una Mesa Técnica y un Consejo Consultivo.
- **Plan de Acción de Hidrógeno Verde 2023-2030.** Para materializar la estrategia se elaboró el “Plan de Acción de Hidrógeno Verde 2023-2030”, que define una hoja de ruta para el despliegue sostenible de esta industria. Este plan contempla 81 medidas concretas en 18 líneas de acción, incluyendo aspectos como regulación, financiamiento, desarrollo tecnológico y formación de capital humano¹⁶.

¹⁶ www.planhidrogenoverde.cl

- **Comité Estratégico de Hidrógeno Verde.** Se crea en julio de 2023 con destacadas personalidades para lograr los acuerdos políticos necesarios para garantizar que es una Estrategia de Estado, presentado por los Ministerios de Energía y de Hacienda.

El detalle de estas acciones y su interacción se describe en el Informe Hidrógeno Verde y Energías Renovables del Instituto de Ingenieros de Chile¹⁷ y la interacción se muestra en la **Figura 1.1.**



Figura 1.1. Esquema de la estrategia participativa

Fuente: Ministerio de Energía, Chile.

Iniciativas CORFO

La Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) ha implementado diversas iniciativas para impulsar el desarrollo del hidrógeno verde en Chile, alineándose con la meta de carbono neutralidad y la transición energética sostenible. A continuación, se destacan las principales acciones:

¹⁷ Informe en www.iing.cl

- **Aporte para Financiamiento:** CORFO adjudicó en una licitación 50 millones de dólares a seis empresas para financiar proyectos de producción de hidrógeno verde en Chile. Las empresas seleccionadas fueron Faro del Sur, HyPro Aconcagua, HyEx, AMER, HV Bahía Quintero, y H2V CAP. El cofinanciamiento opera como reembolso contra inversiones realizadas.
- **Manufactura para el Hidrógeno Verde en la Industria Chilena:** en la licitación fueron adjudicadas las empresas HydroTech Industries y del Centro Mario Molina, para la producción, conversión y adopción de vehículos comerciales a hidrógeno verde y sus componentes.
- **Manufactura de Electrolizadores:** para la fabricación y ensamblaje de electrolizadores en la licitación se adjudicaron dos fábricas en Biobío (empresa española y empresa China) y una en la Región Metropolitana (empresa chilena).
- **Formación de Capital Humano Especializado:** becas para diplomados en universidades.
- **Centro Tecnológico para la Innovación en Hidrógeno Verde de Magallanes:** tiene el objetivo de dar soporte científico-tecnológico y desarrollar capacidades humanas para la industria del hidrógeno verde.
- **Anillos industriales para fomento de demanda:** procesos en desarrollo a la fecha de emisión de este informe para fomentar la demanda de hidrógeno verde y sus derivados.

Estas iniciativas reflejan el compromiso de CORFO con el desarrollo sostenible y la promoción de una industria del hidrógeno verde robusta en Chile, posicionando al país como líder en la transición hacia energías limpias y renovables.

Colaboraciones internacionales existentes y en progreso

Chile ha establecido diversas colaboraciones internacionales para impulsar el desarrollo de la industria del hidrógeno verde, posicionándose como un actor clave en la transición energética global. A continuación, se detallan las principales alianzas con USA, UE, China y otros países:

Unión Europea (UE):

- **Acuerdos de Cooperación.** En junio de 2023, Chile y la UE firmaron acuerdos para el desarrollo de la industria del hidrógeno verde en el país. Estos acuerdos buscan fomentar la cooperación en investigación, desarrollo y financiamiento de proyectos relacionados con el hidrógeno renovable.
- **Team Europe Initiative.** La UE, junto con sus Estados miembros, lanzó la “Team Europe Initiative” para apoyar el desarrollo del hidrógeno verde en Chile. Esta iniciativa conjunta busca fortalecer la cooperación en áreas como tecnología, regulación y financiamiento.

Países Bajos:

- **Agenda de Cooperación Estratégica.** En octubre de 2024, Chile y los Países Bajos actualizaron su agenda de cooperación en hidrógeno verde para el período 2024-2025. Este acuerdo refuerza el compromiso de ambos países en el desarrollo de una economía basada en energías limpias y en liderar la transición energética hacia fuentes sostenibles.

Alemania:

- **Green Hydrogen Summit Chile LAC 2023.** En octubre de 2023, se llevó a cabo la quinta versión de este evento, organizado por el Ministerio de Energía de Chile, la agencia de cooperación alemana GIZ y el Comité de Hidrógeno Verde de CORFO. El evento se enmarcó en el Proyecto Team Europe para el Desarrollo del Hidrógeno Renovable, cofinanciado por el Ministerio Federal de Economía y Protección del Clima de Alemania y la Unión Europea.

Estados Unidos:

- **Colaboraciones en Investigación y Desarrollo.** Chile y Estados Unidos han explorado oportunidades de cooperación en tecnologías limpias, incluyendo el hidrógeno verde, a través de programas de intercambio y proyectos conjuntos de investigación.

China:

- **Interés en Inversiones.** Empresas chinas han mostrado interés en invertir en proyectos de hidrógeno verde en Chile, aprovechando el potencial del país en energías renovables. Sin embargo, hasta la fecha, no se han formalizado acuerdos específicos en esta área.

Otros países:

- **Alianza Latinoamericana de Hidrógeno Verde.** En noviembre de 2021, H2 Chile lideró la firma de una alianza que une los esfuerzos de asociaciones de cinco países latinoamericanos, más un ministerio, para impulsar el desarrollo de la industria del hidrógeno verde con miras a la carbono neutralidad.

Estas colaboraciones reflejan el compromiso de Chile con la comunidad internacional para desarrollar y consolidar la industria del hidrógeno verde, posicionándose como un líder en la transición hacia energías limpias y sostenibles.

Empresas y proyectos relevantes

Diferentes empresas nacionales e internacionales están desempeñando un papel fundamental en el desarrollo de la industria del hidrógeno verde en Chile, contribuyendo a posicionar al país como líder en la producción y exportación de este recurso energético sostenible con una gran dinámica de proyectos en distintas zonas del país, en especial Antofagasta y Magallanes.

Para mostrar el desarrollo de los proyectos de hidrógeno verde y sus derivados y reflejar su dinámica (Figura 1.2), se incluye la referencia de proyectos mostrados por la Corporación de Bienes de capital (CBC), que en su Dashboard CBC incluye en forma interactiva las inversiones Chile, entre otras las de H2V. Su link es <https://www.cbc.cl/ppicbc/>

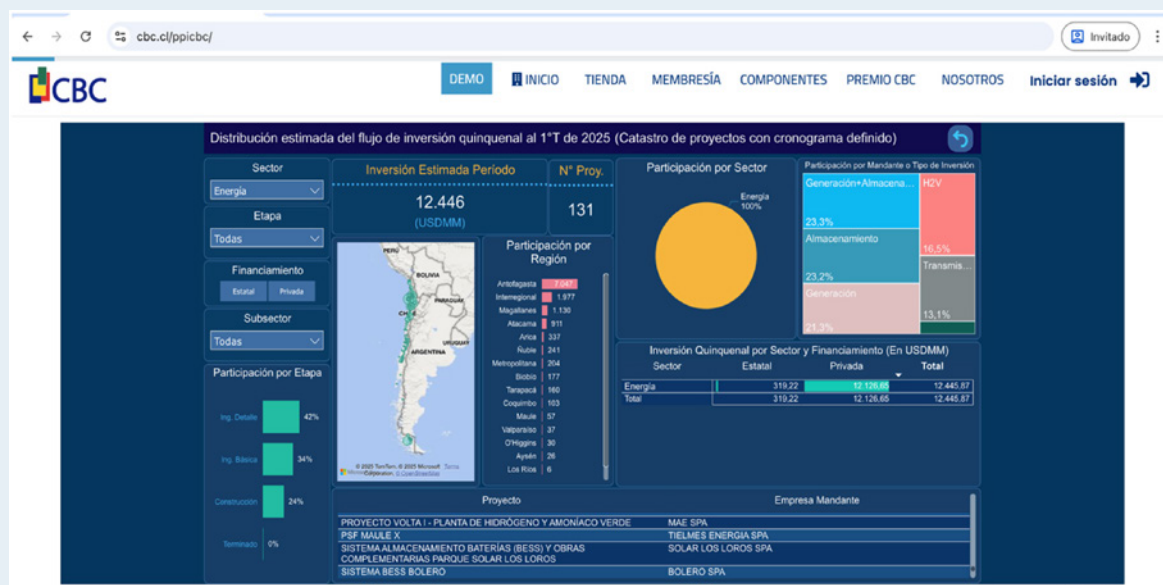


Figura 1.2. Desarrollo de los proyectos de hidrógeno verde y sus derivados

Fuente: CBC.

2

Impulsores del desarrollo de la industria

Los impulsores para el desarrollo de la iH2V son los aspectos tecnológicos y sus avances, así como el desarrollo de generación de energías renovables de bajo costo, unido al desarrollo de mercados externos e internos y los procesos de fabricación a bajo costo.

En Chile esto es posible, y lo reconoce el entorno económico mundial, por la existencia de una Política de Estado de Hidrógeno y de Energía, construida a través de sucesivos gobiernos mostrando la estabilidad de las políticas del país.

2.1. Política de Estado de Hidrógeno en Chile

La política de Estado de un país es una formulación que traza un rumbo económico, social, ambiental y político de largo plazo y fija metas ambiciosas basadas en una visión compartida por amplios sectores. Contiene un conjunto de propuestas de nuevas políticas y medidas para encaminar hacia los objetivos deseados. También existen políticas de Estado en materias específicas, como energía, infraestructura, tecnología, internacional o social, para el bienestar de la ciudadanía y el desarrollo sostenible de un país. Se desarrollan en base a la participación amplia de los distintos actores buscando acuerdos y consensos que permitan abarcar los distintos gobiernos futuros.

La estrategia supone una flexibilidad para adaptarse a situaciones cambiantes de poder y de oportunidades y riesgos, apuntando siempre a los objetivos trazados.

En su diseño participan los principales actores técnicos, la sociedad civil y los organismos del Estado, generando amplios consensos de todos los actores para abordar problemas estructurales guiados por la estrategia de largo plazo.

La estrategia y la capacidad nacional de ejecutar grandes programas

En su diseño, además de trazar los lineamientos de largo plazo, precisar las políticas públicas para impulsar el sector y articular alianzas y proyectos con el sector privado, es fundamental crear nuevas instancias capaces de ejecutar las acciones propuestas. Ello exige coordinar la ejecución entre los participantes principales, supervisar la operación y asegurar la continuidad a través del tiempo evitando que los cambios de gobierno desvíen del curso convenido retardando los programas.

Es importante asegurar que exista una instancia que promueva la prosecución de los objetivos del largo plazo, y haga coherente las acciones de corto y mediano plazo. Esa coherencia es esencial para que exista estabilidad en las relaciones con el sector privado, y que éste cumpla sus compromisos de inversión y gestión.

Los Comités CORFO constituyen una eficaz forma de coordinación estratégica y operativa público / privada en sectores específicos. Deben fortalecerse y adecuarse a la realidad diversa los territorios donde operan, con recursos humanos y expertos especializados en cada área, y recursos financieros para conseguir resultados. Como función esencial de estos comités es que cuentan con las atribuciones y la organización para facilitar la coordinación intergubernamental y entre el sector público y las empresas privadas.

Este informe y la política energética 2050

La Política Energética de Chile (Energía 2050) tiene como objetivo transformar el sector energético al 2050 en uno sostenible, seguro, de calidad, a costo razonable, competitivo, resiliente e inclusivo para toda la ciudadanía. En lo relevante a este informe, las políticas de Estado que se proponen son consistentes con la política energética y la política de hidrógeno verde.

El proceso que condujo a esa estrategia se inició en 2015 a través de diálogos participativos con actores de los sectores público y privado, académicos, sociedad civil, y se estudiaron los progresos técnicos en el sector energía como su impacto en la comunidad.

Para lograr las metas deseadas se establecieron objetivos, una ruta en el tiempo hasta el año 2050, con indicadores y medidas, priorizando las energías renovables, la eficiencia energética y la innovación. Sus pilares son: Seguridad y calidad de suministro, Energía como motor de desarrollo, Energía compatible con el medio ambiente, Eficiencia y educación energética. Adicionalmente se establecieron 10 metas principales al año 2035 y otras 10 metas al año 2050.

La actualización de esta política realizada el año 2021, por un gobierno distinto, mantuvo la continuidad de la política de energía, actualizando sus objetivos, tomando en cuenta el avance del sector a esa fecha y los nuevos desafíos demandados por la sociedad chilena y mundial incorporando también los nuevos desarrollos tecnológicos. Se observa claramente la continuidad de la política de Estado con lo indicado en Energía 2050, y se aprecia un progreso en algunos temas relevantes, después de transcurridos 5 años de la misión original. Se ha conseguido un gran desarrollo en los últimos diez años, con centrales de generación renovable, en especial de tecnologías fotovoltaica y eólica, junto con la instalación de numerosas empresas internacionales de todas las etapas del sistema eléctrico que dinamizan el sector.

Los tres grandes propósitos de esta actualización son: Ser Protagonista global en el aporte de Chile a la agenda climática; generar Energía para una mejor calidad de vida; crear una estructura productiva y un Sistema energético resiliente y eficiente.

La institución que supervisa y actualiza esta política es el Ministerio de Energía dando continuidad al proceso. Desde el punto de vista de empresarios e inversionistas, principalmente internacionales, esta continuidad da confianza para invertir en el país.

La política de hidrógeno verde 2050 y su institucionalidad

La Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde (2020) contempla convertir a Chile en un líder global en la producción y exportación de hidrógeno verde y sus derivados considerando la abundancia y calidad de las energías renovables a lo largo del país, posicionando a Chile como un actor relevante en la transición energética global.

Sus pilares son: Política orientada por misión; Uso equilibrado de recursos y territorio; Nueva Economía de exportación limpia; Ruta eficiente a un país cero emisiones; Hidrógeno verde como motor de Desarrollo Social; Apertura internacional.

Con el cambio de gobierno se ha continuado con la Política de Hidrógeno verde, y para potenciarla en junio de 2022 se creó el Comité para el Desarrollo Sustentable de la Industria de Hidrógeno Verde, un Comité CORFO¹⁸ Este Comité CORFO de Hidrógeno Verde tiene como objetivo acelerar el desarrollo sostenible de la industria de hidrógeno verde y sus derivados en Chile, incluyendo un enfoque regional. El Consejo Consultivo se conformó con una amplia variedad de instituciones invitadas, desde la industria, la sociedad civil, la academia y las organizaciones gremiales, incluyendo al Instituto de Ingenieros de Chile.

¹⁸ Detalle en Informe Hidrógeno verde y energías renovables. Instituto de Ingenieros de Chile, 2023.

Su gobernanza está formada por:

- Consejo Interministerial de 11 ministros
- Mesa Técnica
- Consejo Consultivo

Para lograr los acuerdos políticos necesarios y continuar garantizando que se trata de una Estrategia de Estado que trascienda las diferentes administraciones, los Ministerios de Energía y de Hacienda conformaron a principios de julio de 2023 el Comité Estratégico de Hidrógeno Verde, cuyos integrantes son autoridades de diferentes ámbitos del país y transversal a los últimos gobiernos.

Posteriormente se ha avanzado en esta política construyendo el Plan de Acción 2023-2030 con una amplia participación ciudadana, definiendo acciones concretas para el desarrollo de esta nueva industria del hidrógeno verde. Los pilares del plan de acción son: Fomento al mercado doméstico y a la exportación; Normativa, seguridad y pilotajes; Desarrollo social y territorial; Formación de capacidades e innovación. Son 81 acciones agrupadas en 18 líneas de acción con un calendario de ejecución de cada una, año a año, hasta llegar a la meta del 2030.

La institucionalidad de esta política se mantiene con la participación del Ministerio de Energía, principalmente en los aspectos regulatorios, y de CORFO que fomenta el desarrollo de la capacidad de inversión y de operación con una amplia comunicación con las empresas nacionales e internacionales relevantes en este mercado.

Esta continuidad de las políticas de Estado en energía e hidrógeno verde entrega confianza a las empresas e inversionistas internacionales como también a los distintos actores públicos, privados, academia y ciudadanía para continuar avanzando a cumplir las metas al año 2050.

Para el éxito de esta gran iniciativa es necesario fortalecer a futuro una institucionalidad superior, con capacidad (recursos humanos, financieros y atribuciones) de sostener en el tiempo la continuidad de la estrategia, la supervisión de su avance y la solución de los problemas mediante una eficaz coordinación pública-privada-territorial.

2.2. Dimensión tecnológica

Los factores tecnológicos son fundamentales para desarrollar una industria del hidrógeno verde escalable y sostenible, que contribuya significativamente a la transición hacia un sistema energético más limpio y renovable. Para ello, se debe aumentar la inversión y los proyectos piloto, así como las infraestructuras necesarias para la producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno verde a gran escala. Para lo cual se requiere:

- **Avances en electrólisis:** las tecnologías de electrólisis mejoran en eficiencia y efectividad y disminuyen su costo, utilizando fuentes de energía renovables, así como en tecnologías de almacenamiento y transporte.
- **Integración con energías renovables:** permite la expansión de las capacidades de energía solar y eólica unida al almacenamiento eléctrico que proporcionan la electricidad necesaria para producir hidrógeno verde de manera sostenible.
- **La electrólisis del agua:** se mantiene como el método principal para producir hidrógeno verde.
- **Captura y almacenamiento de carbono (CCS):** se puede emplear CCS para reducir la huella de carbono asociada a la producción de hidrógeno azul mediante métodos como la captura y almacenamiento del CO₂ generado durante la producción de hidrógeno gris.
- **Celdas de combustible:** para utilizar el hidrógeno verde como fuente de energía, se emplean celdas de combustible que convierten el hidrógeno y el oxígeno nuevamente en electricidad, generando agua como único subproducto.
- **Almacenamiento y distribución:** se utilizan tecnologías para almacenar el hidrógeno, como la compresión y el almacenamiento en tanques o su conversión en formas químicas más fáciles de manejar, como amoníaco o metanol. La distribución eficiente del hidrógeno también requiere tecnologías adecuadas para su transporte y uso.

Existe un gran desarrollo de las componentes de esta nueva industria en diferentes países y se destacan a continuación, avances en China.

- **Desarrollo de Nuevos Electrodo para Electrolizadores.** Investigadores chinos han creado electrodos avanzados de hidróxido de níquel dotados de cobalto y catalizadores de metales no nobles, mejorando significativamente la eficiencia y estabilidad de la electrólisis del agua en dos etapas.
- **Implementación de Electrolizadores de Gran Escala.** China ha puesto en marcha proyectos de gran envergadura, con electrolizador alcalino de 150 MW y sigue aumentando en tamaño.

- Liderazgo en Capacidad de Producción de Electrolizadores (1,2 GW), con un control de aproximadamente el 50% de la capacidad instalada de electrolizadores de hidrógeno bajo en carbono a nivel mundial.

China ha logrado una reducción significativa de costos en la Fabricación de Electrolizadores, comparado con otras regiones, con precios que pueden ser hasta tres veces menores que en Europa y EE. UU., en efecto el costo de fabricación e instalación de electrolizadores fuera de China está en el rango 2.000-2.600 US\$/KW y en China el rango es 600-1.200 US\$/KW¹⁹. Esta ventaja competitiva se debe a una cadena de suministro sofisticada y a menores costos de capital humano, facilitando una adopción más amplia del hidrógeno verde tanto a nivel nacional como internacional.

2.3. Dimensión económica y de mercados

2.3.1. Fabricación de hidrógeno verde

En la cadena de producción del hidrógeno verde se avanza aceleradamente en una reducción de los costos de producción debido a la incorporación de nuevos fabricantes y países, con lo cual se genera una competencia por tecnología, eficiencia y costos que llevan a una proyección de reducción de precio fuerte en los próximos 5 a 10 años y una reducción más pausada en los próximos 20 años. En este sentido los componentes principales para fabricación de hidrógeno verde son electrolizadores, agua y energía limpia.

Electrolizadores

- **Nuevas tecnologías en estudio.** El desarrollo de Electrolisis con agua de mar permite eliminar la etapa de desalar agua bajando los costos y eliminando una etapa del proceso de fabricación de hidrógeno.

Actualmente, para la fabricación de hidrógeno al utilizar agua de mar se deben construir grandes plantas de desalinización para realizar ósmosis inversa y suministrar suficiente agua dulce para alimentar la producción de hidrógeno. Sin embargo, la construcción, operación y mantenimiento de las plantas desalinizadoras presentan varios factores de estrés ambiental preocupantes, como el ruido, la modificación del suelo, la interrupción de las corrientes de agua y, más notoriamente, las tuberías de aducción y la descarga de efluentes (salmuera, productos químicos y metales pesados)²⁰.

¹⁹ IEA Global Hydrogen Review 2025.

²⁰ Informe Hidrógeno verde y energías renovables. Instituto de Ingenieros de Chile, 2023.

También se avanza en forma alternativa a la desalación de agua en la utilización de aguas residuales de ciudades costeras evitando la descarga de emisarios con aguas servidas al mar, con un efecto positivo en el medio ambiente y en la percepción de la comunidad hacia el proyecto.

- **Economías de escala.** Independientemente de las etapas incipientes de la fabricación de hidrógeno verde ya se está produciendo una competencia de fabricantes de distintos países incluyendo China, que en los últimos años ha desarrollado la automatización de procesos y economías de escala para abastecer el mercado interno y exportar equipos a mercados internacionales.

El aumento de tamaño de los electrolizadores y la automatización de sus procesos de fabricación implica una baja importante de costos tanto en el proceso de fabricación y, por lo tanto, en su inversión como también en sus labores de mantenimiento y operación, lo cual se estima produce reducción de precios del orden de un tercio de los valores actuales.

- **Nuevos fabricantes y competencia.** Esta incorporación de fabricantes de distintos países para abarcar diferentes mercados aumenta los tamaños de los equipos y, por lo tanto, las economías de escala generando una fuerte competencia entre fabricantes de electrolizadores, tal como ha ocurrido en el pasado con los fabricantes de equipos de generación fotovoltaicas y eólicas que dieron como resultado bajas de costos relevantes. La competencia entre fabricantes para tomar el mercado mundial genera avances tecnológicos para tener procesos más eficientes en electrólisis, tecnología centenaria que puede mejorarse ante una mayor competencia de fabricantes.

Energías renovables y ventaja de Chile

Un elemento importante para la fabricación de hidrógeno verde y sus derivados son los costos de electricidad limpia. Los costos de energías renovables siguen teniendo bajas de precios en menor intensidad, pero con aumentos de eficiencia en generación eléctrica, situación favorable para un país como Chile que tiene recursos naturales de alta calidad en energía solar en el norte y energía eólica en la zona sur austral y con un potencial de más de 2300 GW de energías renovables.

Estas nuevas tecnologías más eficientes corresponden a desarrollos a nivel mundial y también a desarrollos locales para aprovechar las condiciones de radiación solar y vientos especiales de Chile.

La amplia ventaja de Chile en el potencial y bajos costos de energía renovables permiten en una primera etapa el desarrollo proyectos *off-grid* para cumplir las normas de certificación y se avanza en tener una red eléctrica nacional predominantemente renovable que permite la certificación de hidrógeno verde con proyectos conectados a ella.

Asimismo, en el país se avanza en la construcción local de componentes como, por ejemplo, la construcción de torres de hormigón en vez de torres metálicas importadas en los proyectos de generación eólica, con una experiencia de varios años que además permite simplificar la logística de transporte de torres.

El primer análisis en detalle del potencial de generación renovable en Chile fue realizado el año 2014 por el Ministerio de Energía/GIZ y Universidad de Chile para el territorio del Sistema Eléctrico Interconectado²¹ sin incluir Aysén ni Magallanes, informe que indicaba un potencial de generación renovable de 1865 GW.

Para el desarrollo de Planificación Energética de Largo Plazo (PELP) del proceso 2023-2027, el Ministerio de Energía realiza una actualización incluyendo el potencial de todo el país con un valor de 2153 GW que se presenta en el **Cuadro 2.1** con las tecnologías principales.

Como comparación, la generación instalada a inicios del año 2025 en todo Chile es del orden de 35 GW, incluyendo generación renovable tradicional y no convencional y generación fósil. Por lo tanto, hay posibilidades de desarrollo por más de 2.100 GW. de potencia instalada sin considerar la posible ocupación de terreno por varias tecnologías en forma conjunta.

²¹ Informe Hidrógeno verde y energías renovables. Instituto de Ingenieros de Chile, 2023.

Cuadro 2.1

Región	Eólica	Geotermia	Solar CSP	Solar FV	Hidro-eléctrica	Total Regional (MW)
Arica y Parinacota	0	250	33.460	21.787	0	55.497
Tarapacá	0	477	219.897	54.294	0	274.668
Antofagasta	15.045	2.049	544.325	327.064	0	888.483
Atacama	316	0	64.115	159.772	0	224.203
Coquimbo	1.191	0	762	30.467	10	32.430
Valparaíso	24	0	0	17.036	54	17.114
Metropolitana	33	0	0	33.050	259	33.342
O'Higgins	45	200	0	68.215	483	68.943
Maule	1.167	490	0	163.450	1.813	166.920
Ñuble	1.705	27	0	103.575	375	105.682
Biobío	12.318	100	0	74.218	2.095	88.731
Araucanía	6.657	172	0	19.139	1.550	27.518
Los Ríos	3.123	77	0	0	1.096	4.296
Los Lagos	15.584	0	0	753	1.562	17.899
Aysén	20.255	0	0	4.592	833	25.680
Magallanes	121.915	0	0	0	0	121.915
Total MW	199.378	3.842	862.559	1.077.412	10.130	2.153.321

Fuente Ministerio de Energía Identificación y cuantificación de potenciales de energías renovables, 2021.

Políticas públicas y regulatorias en Chile

Chile, manteniendo su política de apertura comercial, aprovecha estos desarrollos globales para obtener los equipos de menor precio y de mejor calidad para poder producir hidrógeno y amoníaco verde a precios competitivos con el mercado mundial, acercándose a su equivalente fósil.

En los mercados de ofertas de hidrógeno verde, Chile debe mantenerse en un plano prioritario siempre y cuando se desarrollen con rapidez los proyectos. Chile muestra actualmente y lo seguirá manteniendo a futuro la capacidad de desarrollar en forma rápida y eficiente proyectos piloto para los distintos elementos de la cadena industrial del hidrógeno verde, ya sea combustibles sintéticos o amoníaco verde.

En políticas públicas, al ser la política energética y de hidrógeno verde Políticas de Estado, la continuidad de éstas permite el desarrollo de la industria en todos sus aspectos y también en la exportación de hidrógeno y amoníaco verde con una continuidad a través de los sucesivos gobiernos, lo que da garantía a los inversionistas y a los compradores.

En Chile los subsidios en el sector energía están bastante restringidos, solamente en casos puntuales y en montos limitados para pequeños consumidores o pequeñas industrias en los casos de la electricidad, agua y de gas natural en Magallanes, por lo cual no se espera cambio en esta política, sino que se sigue operando en un esquema de economía abierta.

No existen subsidios directos a la oferta para el desarrollo de proyectos, excepto concursos focalizados de CORFO para incentivar el desarrollo de tecnologías, pero con un aporte de bajo monto que sirve para dar señales de mercado.

Sin embargo, se puede incentivar la demanda para aplicaciones de hidrógeno verde de pequeños consumidores como la incorporación de hidrógeno verde en las redes de gas natural, para el desarrollo en algunas regiones de Chile, apoyando a pequeños agricultores para la aplicación de fertilizantes verdes, facilitando la fabricación local de hidrógeno verde de zonas productivas en agricultura o el uso de cargadores en bodegas. Las políticas de incentivos tributarios, contribuyen al desarrollo de la industria local y, principalmente, fomentar la demanda local.

Al mismo tiempo se pueden desarrollar tareas de capacitación y de formación y reconversión de trabajadores de las distintas áreas de la industria del hidrógeno y sus derivados como de industrias anexas para mejorar la competitividad y productividad del país.

Sin embargo, desde los años 90, a través de distintos mecanismos, se subsidia el precio de petróleo diésel, gasolina y kerosene a los clientes finales. Este subsidio favorece al petróleo y sus derivados rompiendo la neutralidad tecnológica con respecto a las energías renovables y energía térmica renovable.

A pesar de que Chile no tiene subsidios para proyectos o industrias específicas de montos comparables con países desarrollados, sí puede aprovechar los menores costos de producción de electricidad de fuentes renovables y el gran potencial disponible en todo el país, junto con la participación en un mercado global de equipos electrolizadores de calidad y a precios competitivos.

2.3.2. Exportación

Mercados principales: Europa, Asia

Diversos estudios realizados por diferentes organizaciones, por ejemplo: IRENA²², coinciden en que los mercados que deben importar hidrógeno verde y sus derivados son la Unión Europea y los mercados de Asia, en especial Corea del Sur y Japón.

Los mercados asiáticos, además de sus políticas de cambio climático y reducción de huella de carbono, son países deficitarios en energía por su falta de recursos naturales, por lo tanto, diversifican su matriz de importación de energía utilizando hidrógeno verde, amoníaco verde, metanol verde y combustibles sintéticos.

Estos mercados son una oportunidad para los productos chilenos de hidrógeno verde y sus derivados en la etapa inicial de esta nueva industria, pero también se deben mantener en el tiempo satisfaciendo los incrementos de demanda futuros manteniendo las mejores condiciones técnicas, económicas y de respeto de contratos, adecuándose a los movimientos de otros países productores.

Sin embargo, por la posición geográfica de Chile al estar a distancias de 8.000 a 12.000 kilómetros de los mercados principales, se debe considerar el costo de transporte y las alternativas de exportar hidrógeno, amoníaco o metanol verde para obtener un óptimo económico y ser competitivo con otros países productores.

Los países competidores de Chile en esta industria de exportación no son solamente países emergentes como Australia, Brasil, Norte de África, Arabia Saudita, sino también países de Europa como Alemania, Países Bajos y Dinamarca, por lo tanto, se debe mantener una apertura de nuevos mercados y consolidar una política comercial dinámica y a precios competitivos considerando los mayores costos de transporte desde Chile a los mercados relevantes.

Productos: Hidrógeno verde, amoníaco verde, combustibles sintéticos, metanol

Es importante destacar que en la industria del hidrógeno verde y sus derivados el aumento de las exportaciones se realiza principalmente a través de amoníaco verde, metanol y combustibles sintéticos de acuerdo con los niveles de tecnologías de los países consumidores. Con el avance de nuevas tecnologías de transporte y de almacenamiento se espera utilizar directamente hidrógeno verde para la generación y almacenamiento de electricidad, pero durante los primeros años el transporte es principalmente a través de amoníaco verde.

²² IRENA, Geopolitics of the Energy Transformation. The Hydrogen Factor, 2022.

Un punto importante es entregar los productos requeridos por los mercados externos en función de sus políticas de desarrollo comercial y de control de cambio climático y, por lo tanto, se debe mantener una dinámica de adaptación a los mercados con una concepción de flexibilidad.

Acuerdos internacionales

El desarrollo de acuerdos internacionales para la descarbonización del planeta y la incorporación de Chile a estos acuerdos permite avanzar en forma rápida en el desarrollo de hidrógeno verde y sus derivados dentro del marco de la transición energética.

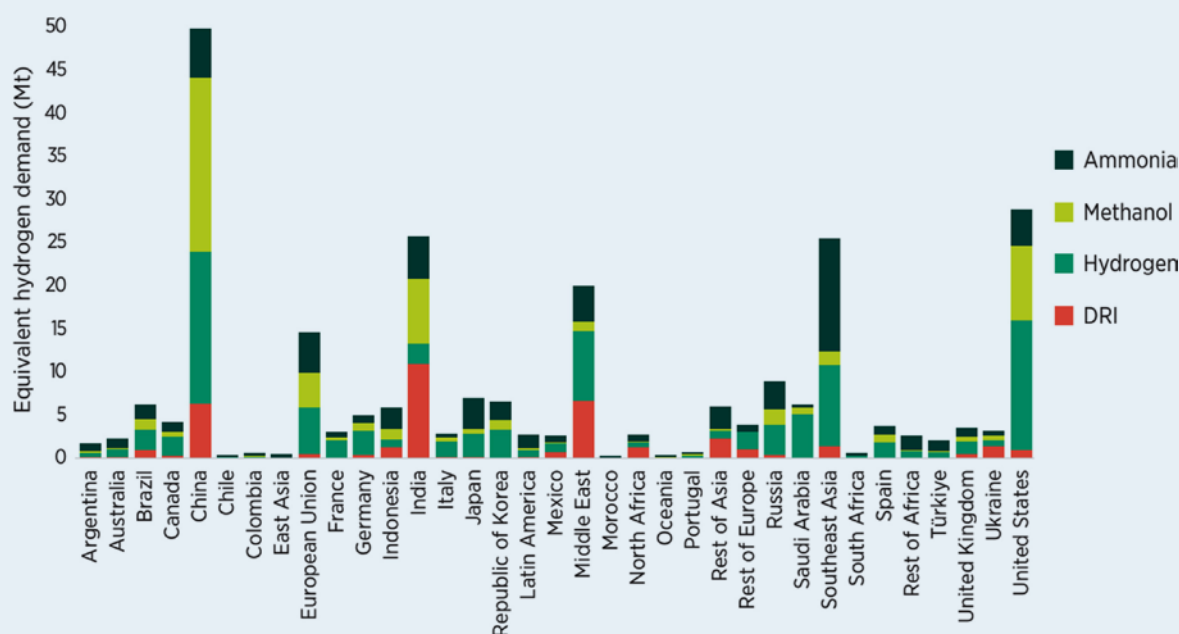
Es importante la continuidad de la inserción del país en los mercados y los organismos internacionales para un planeta sostenible, de la misma forma en que el país ha celebrado una multitud de acuerdos de libre comercio.

A los avances iniciales de convenios con puertos de Europa para la exportación de hidrógeno y amoníaco verdes y de convenios de cooperación financiera, técnica y jurídica con la Unión Europea, se avanza en el desarrollo de convenios de exportación de estos elementos no solo con Europa sino también con países asiáticos.

En este sentido son destacables los acuerdos firmados con puertos europeos para el desembarco de hidrógeno verde en la Unión Europea como también las negociaciones con Japón y Corea del Sur, países consumidores de energía.

Demanda internacional

En la **Figura 2.1** se muestra la última proyección de IRENA del consumo mundial de hidrógeno verde y sus derivados al año 2050, separado por países consumidores y los productos relevantes: amoníaco verde, metanol verde, hidrógeno verde y reducción directa de hierro.



Notes: DRI = direct reduced iron; Mt = million tonnes.

Figura 2.1. Última proyección de IRENA del consumo mundial de hidrógeno verde y sus derivados al año 2050

Fuente: Analysis of The Potential For Green Hydrogen And Related Commodities Trade, Irena 2025.

2.3.3. Demanda interna

Transporte

En el sector transporte se tiene principalmente transporte de carga terrestre, por ferrocarril, camiones mineros y transporte marítimo.

- Transporte de carga de larga distancia en camiones utilizando hidrógeno por su mayor autonomía, con red de hidrolinerías situadas a centenares de kilómetros y con carga en pocos minutos permiten su desarrollo, pero es conveniente reducir los subsidios al combustible diésel, para evitar una competencia desleal de este combustible fósil a los combustibles renovables.
- Transporte de carga por trenes, utilizando locomotoras de ferrocarril con combustible de hidrógeno en vez de diésel y también en vez de ferrocarriles eléctricos, en este caso con la ventaja de evitar los costos de instalaciones de eléctricas de catenarias y subestaciones y principalmente por el robo de los conductores de cobre de las catenarias, fenómeno de ocurrencia mundial.
- Transporte marítimo, suministrando amoníaco tanto para barcos de cabotaje en territorio nacional como para barcos en transporte internacional.

- Camiones mineros con remplazo de diésel como combustible, pero también se debe considerar el incipiente desarrollo de camiones eléctricos conectados a líneas trolley.

Fertilizantes agrícolas

Un proyecto piloto desarrollado en el año 2024 en la Región de la Araucanía aprovecha los excedentes de una planta de generación eléctrica, en este caso particular de biomasa, para producir hidrógeno verde y posteriormente producir fertilizantes agrícolas para ser utilizados en la misma zona de gran desarrollo agrícola.

Este tipo de desarrollos regionales de plantas de pequeña escala se visualiza con una replicación en diversas zonas evitando el costo de fletes de fertilizantes importados y los problemas de logística internacional asociados como los ocurridos durante la pandemia con problemas de escasez y alzas bruscas de precios.

Chile, con un desarrollo agrícola tanto frutícola, hortícola, como de agricultura tradicional, en todas las regiones del país con distintos productos agrícolas permite el desarrollo de una nueva industria, la disminución de costos para productos de menor contenido en CO₂ facilitando su exportación a mercados de gran tamaño en el extranjero y permitiendo una mayor competencia al sector agrícola de exportación.

Minerales verdes

El proceso de minerales con baja huella de carbono se desarrolla utilizando hidrógeno verde en los procesos mineros, en especial, en el caso del cobre y del hierro.

Se denomina proceso de reducción directa de hierro a todos los procesos de reducción de óxidos de hierro distintos a los que se realizan en alto horno, procesos que se efectúan sin llegar a la fusión denominado hierro esponja o pre reducido.

El hierro de reducción directa (DRI) a base de hidrógeno es una alternativa para reemplazar el uso de combustibles fósiles en la fabricación de hierro. Un ejemplo es el caso de Australia que utiliza recursos energéticos renovables para la producción de hidrógeno verde con menores costos para transformar el mineral de hierro en “hierro verde” para exportarlo a las acerías que busquen reducir las emisiones, en vez de desarrollar procesos de hidrógeno verde en altos hornos para producir acero con un bajo contenido de CO₂.

El proceso de fabricación de hierro de reducción directa, que no es un proceso nuevo, actualmente utiliza gas natural que es reemplazado por hidrógeno verde para bajar su contenido de CO₂.

Este proceso se puede complementar con la fabricación de acero utilizando procesos de arco eléctrico, con lo cual se obtiene acero verde sin utilizar altos hornos reduciendo las instalaciones requeridas y aprovechando la abundancia de electricidad renovable.

Para ambos casos, Chile tiene abundancia de minerales de hierro con lo cual se desarrollan procesos junto a la gran disponibilidad de energía renovable, por lo cual es una alternativa a la producción de acero en altos hornos.

En la **Figura 2.2**, se muestra el esquema de producción de hierro por reducción directa comparando la utilización de hidrógeno y de gas natural²³.

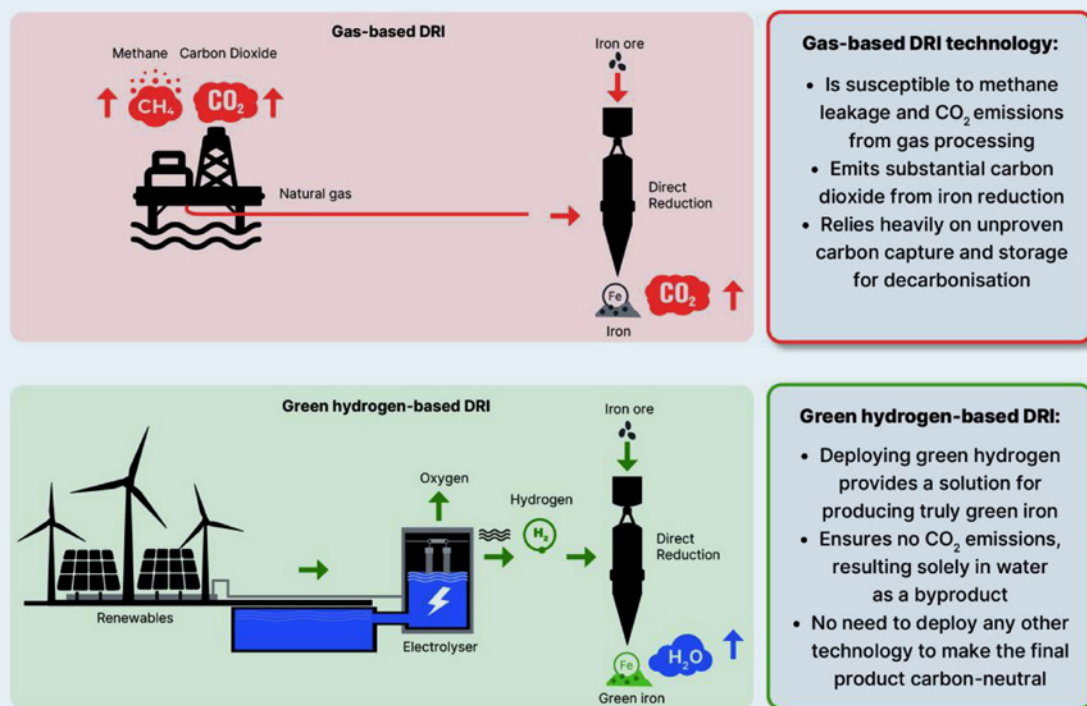


Figura 2.2. Producción de hierro por reducción directa comparando la utilización de hidrógeno y de gas natural

²³ Instituto de Análisis Económico y Financiero de la Energía (IEEFA).

Australia se está focalizando en el desarrollo industrial en diversas líneas de producción manteniendo la industria de exportación de hidrógeno verde e incorporando el desarrollo de hierro con reducción directa utilizando hidrógeno verde, para facilitar el transporte a otros mercados.

3

Desafíos, brechas y oportunidades globales y en Chile

En el país, para el desarrollo de la iH2V se deben superar desafíos tecnológicos, de mercado, legislaciones sectoriales como también de comportamiento empresarial y comercial, para compartir infraestructura con el objeto de bajar costos y adelantar procesos.

Sin embargo, las oportunidades son amplias al disponer con amplitud de recursos básicos para la iH2V como son electricidad renovable, agua de mar y procesos mineros, junto con la continuidad de políticas públicas, formación y reconversión de capital humano que dan como resultado la exportación de productos, tecnología, ingeniería y la movilidad de recursos humanos.

3.1. Desafíos y brechas

El mercado enfrenta desafíos significativos: altos costos iniciales, transporte y logística, la necesidad de avances tecnológicos y la creación de una infraestructura adecuada como en toda industria nueva.

- **Crecimiento:** la industria del hidrógeno verde experimenta un crecimiento significativo y continuara expandiéndose en las próximas décadas, impulsada por la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y avanzar hacia economías más sostenibles.
- **Infraestructura:** la infraestructura de producción, transporte, almacenamiento y distribución de hidrógeno requiere con una inversión considerable que incluye la construcción de electrolizadores de gran escala, redes de distribución y sistemas de almacenamiento adecuados.

- **Adopción Tecnológica:** la adopción de tecnologías avanzadas, como la electrólisis de alta eficiencia y las celdas de combustible mejoradas, juega un papel crucial en la expansión de la capacidad de producción de hidrógeno verde.
- **Costos:** los costos están disminuyendo, pero el hidrógeno verde aún es más caro que las alternativas basadas en combustibles fósiles. Con el avance de la tecnología y aumento en la escala de producción, se produce una disminución significativa en los costos de producción del hidrógeno verde, que lo hace más competitivo frente a otras formas de energía.
- **Seguridad:** el manejo y almacenamiento de hidrógeno, como con cualquier otro producto, requiere realizar gestión de alta seguridad con regulaciones técnicas adecuadas.

3.1.1. Infraestructura compartida

La infraestructura compartida es un tema habilitante para el desarrollo de la industria del hidrógeno verde y sus derivados, que habitualmente es difícil de implementar por la competencia comercial entre las distintas empresas, pero se avanza para constituir hubs industriales de hidrógeno verde para esta industria. Principalmente se debe compartir infraestructura en los temas relacionados con puertos, almacenamiento de hidrógeno y sus derivados, centrales generadoras, ductos y servicios asociados a varios productores.

El desarrollo de infraestructura compartida permite su avance a través de distintas zonas del país (Antofagasta, Coquimbo, Valparaíso, Santiago, Biobío, Magallanes principalmente) de ductos de transporte de hidrógeno y amoniaco verde constituyendo una red logística de transporte y distribución. Posteriormente estas redes deben cubrir todo el país para abastecer la demanda local y conectar la producción regional de pequeña y gran escala.

Puertos

El desarrollo de puertos es importante, no solamente en la operación, sino también en la parte previa a la construcción de las centrales renovables y de las instalaciones de fabricación de hidrógeno y amoniaco, ya que implican procesos de descarga de materiales de amplias dimensiones. Nuevos puertos y ampliación de los puertos existentes permiten descargar componentes en plazos razonables evitando procesos de años de duración y también con la posibilidad de ocupar estos puertos para el comercio tradicional.

También en los puertos se desarrollan las instalaciones y ductos necesarios para suministrar amoníaco verde al transporte marítimo aprovechando la posición estratégica que tiene Chile en el Pacífico sur sobre todo en Punta Arenas, considerando las restricciones del Canal de Panamá por las sequías. Adicionalmente, permite el transporte marítimo limpio para ingresar a la Antártica tanto para transporte de carga como cruceros de turismo.

Logística

El desarrollo de logística es necesario para el transporte de componentes en la etapa de construcción de centrales generadoras y de plantas de hidrógeno y posteriormente en la operación, tanto para ductos como para camiones que transporten hidrógeno y sus derivados. Este es un elemento que el país debe enfrentar con rapidez, para proyectos actuales y futuros, para lo cual se tiene la tecnología y conocimientos necesarios como lo demuestra la construcción de parques eólicos del orden de 800 MW, pero se proyecta un mayor volumen en tiempos reducidos.

Durante la construcción de las plantas de hidrógeno verde es necesario la construcción de nuevos puertos y ampliación de los existentes para descargar las componentes de los parques eólicos en plazos razonables para permitir su operación, ya que con las instalaciones actuales esa descarga tendría plazos de varios años.

Hidroductos

Para el transporte de hidrógeno a grandes distancias, como es el caso de la geografía chilena, se requieren tuberías especiales. El hidrógeno gaseoso para su transporte se debe comprimir a una presión del orden de 50-80 bares, lo que permite transportarlo en altos volúmenes y grandes distancias.

Un hidroducto es una tubería que transporta hidrógeno, en forma similar a un gasoducto diseñado para transportar gas natural gaseoso, difiriendo en los materiales de la tubería y sus elementos de unión.

También se pueden utilizar las tuberías de gas natural para transportar mezclas de gas natural e hidrógeno verde o reconvertirlas para transportar hidrógeno, teniendo en consideración las posibles fallas tempranas de los materiales de los gasoductos reutilizados, debido a la distinta composición de hidrógeno verde con respecto al gas natural.

Almacenamiento

Las instalaciones de almacenamiento de hidrógeno verde o de amoníaco verde se requieren tanto en las fábricas de hidrógeno, en puertos para su exportación y en consumos importantes.

El hidrógeno en forma líquida tiene una densidad de energía considerablemente más alta que en su forma gaseosa, por lo que es un medio de almacenamiento atractivo. Sin embargo, tiene la desventaja de la energía requerida para licuar el gas y el estricto control necesario sobre la estabilidad de la temperatura del contenedor para evitar cualquier riesgo de sobrepresión. También requiere recipientes criogénicos y sufre pérdidas de hidrógeno a través de la evaporación de los recipientes.

Desalación

El país ha enfrentado adecuadamente los requisitos necesarios para el desarrollo industrial de plantas desaladoras de agua de mar, en algunos casos con la concesión de terrenos fiscales, agilización del trámite de concesiones marítimas, en especial para las plantas desaladoras, que suministran el agua para el proceso de electrólisis y el desarrollo de normativa ambiental específica para los proyectos de hidrógeno incluyendo guías especiales de análisis.

La desalación de agua de mar para el sector minero tiene décadas de desarrollo en el país, tanto en faenas de pequeña, mediana y gran minería. Posteriormente se han desarrollado proyectos para abastecimiento de agua potable en ciudades, por lo tanto, la desalación de agua de mar es una tecnología probada en la práctica en varios lugares del país.

Tratamiento de aguas servidas de ciudades costeras

Una fuente adicional de agua para la electrolisis consiste en el tratamiento de aguas servidas de ciudades costeras para su conversión en agua industrial y posteriormente su purificación para agua necesaria para la electrolisis. Tiene la ventaja de mejorar ambientalmente las ciudades costeras y el mar cercano, con lo cual se logra a una aprobación ciudadana al proyecto de hidrógeno verde por sus contribuciones a la comunidad local.

3.1.2. Legislaciones sectoriales

La coordinación de las distintas instituciones y organismos públicos permite el avance oportuno de las obras para el desarrollo de la oferta y la demanda con plazos y costos adecuados.

Para los diferentes permisos de construcción y operación es recomendable que se continúe con el desarrollo de guías especiales para proyectos hidrógeno verde tal como en la actualidad existen estas guías de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles y del Servicio de Evaluación Ambiental²⁴.

Permisos

Los permisos requeridos en la legislación chilena para las construcciones industriales, en este caso hidrógeno y amoníaco, son de distinto tipo y pueden facilitarse en el caso de desarrollo de hubs que permitan ocupar terminales marítimos, plantas desaladoras de agua, tuberías de transporte, centrales de generación eléctrica, líneas de transmisión eléctrica, instalaciones industriales y almacenamiento para ocuparlas en distintos proyectos de varios propietarios.

Excepto los permisos e instalaciones industriales de fabricación de hidrógeno y amoníaco, el resto de las componentes se refiere a permisos ambientales desarrollados en proyectos similares. Por lo tanto, para su rápido desarrollo en el tiempo, se requiere recoger la experiencia de esos otros proyectos industriales y mejorar sus prácticas, manteniendo durante sus tramitaciones buena y adecuada comunicación con las autoridades sectoriales y con las comunidades regionales.

Ambiental

Esta legislación ambiental unida a las políticas de Estado en Energía y en Hidrógeno Verde permite dar a los inversionistas, principalmente extranjeros, la certeza jurídica de reglas estables independientes del gobierno de turno. Sin embargo, un tema preocupante es la judicialización posterior por parte de terceros ajenos al proyecto.

En este sentido la autoridad ambiental ha preparado guías específicas para el desarrollo de distintos tipos de proyectos, como centrales eólicas, proyectos de hidrógeno, proyectos industriales y se siguen desarrollando para agilizar la tramitación de permisos.

Es importante mantener la certeza jurídica durante los procesos de tramitación en los distintos proyectos y evitar judicializaciones que interrumpan la construcción de las obras.

²⁴ informe hidrógeno verde y energías renovables del Instituto de ingenieros de Chile.

Seguridad

Las normas de seguridad para la producción de hidrógeno, tanto en transporte, almacenamiento y utilización, tienen actualmente disposiciones adecuadas en los temas de seguridad y estos estándares se están actualizando continuamente, por lo cual no existen problemas de un manejo seguro de este vector energético. Sin embargo, estas normas tienen que actualizarse constantemente de acuerdo con los desarrollos tecnológicos futuros y la experiencia internacional.

3.1.3. Exportación de hidrógeno verde y sus derivados

Los altos precios del hidrógeno verde a comienzos de la década de 2020 han ido disminuyendo, principalmente en Chile, debido a su potencial de energía renovable y de bajo costo de producción, desarrollo de infraestructura compartida, políticas públicas de Estado, junto a una conciencia planetaria sobre la disminución de combustibles fósiles y de CO₂. Esto permitirá tener costos menores a los del hidrógeno fósil y también con respecto al hidrógeno azul que ha sido un paso intermedio para desarrollar la demanda de hidrógeno y, posteriormente, pasar a hidrógeno verde, dependiendo de la variación de los precios del gas natural.

Para obtener estos resultados, ha sido importante la apertura comercial de Chile para obtener las componentes de esta industria de los países que ofrecen mejores precios y mejor calidad técnica, incluyendo aquellos que se están incorporando en esta industria constructiva.

La larga distancia hacia los mercados relevantes de Europa y Asia tienen el desafío de elegir en forma adecuada el producto a transportar para su exportación. En este sentido, lo que se mantiene en las próximas décadas es el transporte de amoníaco verde y metanol verde por ser tecnologías probadas y de menor costo.

Además, los combustibles con bajas emisiones de CO₂ para funcionamiento de barcos de mayor penetración en el mercado son amoníaco y metanol verdes.

Productos

Los productos principales de esta industria son:

- Hidrógeno verde
- Amoníaco verde
- Combustibles sintéticos
- Metanol verde

Los usos actuales del hidrógeno fósil en Chile son los procesos de refinerías de petróleo para desulfuración del crudo (98% del consumo), industria alimenticia (grasa y margarinas)²⁵ y fabricación de vidrios planos. Además de la importación de amoníaco fósil para la confección de explosivos y fertilizantes.

Para la exportación de productos se debe considerar el transporte, que requiere temperaturas de licuefacción a presión normal de:

- Hidrógeno - 252°C
- Gas natural licuado - 162°C
- Amoníaco - 33°C
- Metanol verde + 65°C

Esto indica que para las próximas décadas el transporte es realizado vía amoníaco y metanol por requerir condiciones menos exigentes y de uso normal en la industria de transporte naviero.

Exportación de Tecnología

Un desafío importante es la generación de la capacidad de exportar tecnología, tal como lo están haciendo países europeos y desde el inicio de esta industria aprovechar la gran ventaja de exportar tecnología e ingeniería de clase mundial.

Esto es, realizar en forma eficiente el camino desde la industria y del producto a la transferencia de conocimientos y posteriormente exportar dicha tecnología a diferentes países, aprovechando la capacidad tecnológica y de innovación del país y de sus recursos humanos de alta capacitación.

3.1.4. Demanda interna

Un desafío importante es el avance del desarrollo de demanda local en distintos ámbitos, camiones en la minería, trenes de carga, así como también la demanda de pequeña escala, por ejemplo, generadores de emergencia pequeños, cargadores en bodegas, etc.

²⁵ Las grasas hidrogenadas o grasas trans (a diferencia de las grasas cis) son tóxicas para el organismo. Están prohibidas en la Unión Europea y en Estados Unidos. En Chile, lamentablemente, aún se permiten. Se encuentran en margarinas y grasas sólidas de origen vegetal, así como en productos procesados industrialmente. Ver, por ejemplo: https://en.wikipedia.org/wiki/Fred_Kummerow

El transporte terrestre de carga enfrenta la competencia de la electromovilidad y del transporte con gas natural comprimido, que hasta el momento no ha tenido un gran desarrollo en el país. El desafío son los costos del hidrógeno, y de la puesta en marcha de una red de hidrolineras, con la ventaja de un espaciamiento de 500 km al considerar que la autonomía actual de los camiones es de 700 km.

El desarrollo de trenes de carga con hidrógeno tiene la ventaja de evitar el uso de combustibles fósiles y en comparación con trenes eléctricos tiene una mayor rentabilidad al evitar el robo de catenarias de trenes eléctricos, situación que es un fenómeno negativo en muchos países, incluso en trenes de pasajeros, manteniendo la continuidad en el tráfico de carga.

El suministro para abastecer la demanda local de hidrógeno requiere redes de carga locales y su abastecimiento en forma constante.

3.1.5. Transporte marítimo

Al poseer miles de kilómetros de costa, el transporte marítimo de carga y de turismo debe ser una actividad relevante para el país, situación que no ocurre en la actualidad y que se profundiza con la libertad de cabotaje entre puertos chilenos para naves extranjeras, lo cual permite el desarrollo de transporte marítimo en especial de carga, con la ventaja de usar como combustible amoniaco verde nacional.

El desarrollo de esta industria marítima es un gran desafío que permite reducir los costos de transporte de carga y fomentar el turismo al utilizar hidrógeno verde nacional para buques nacionales y extranjeros, en especial en rutas a la Antártica, al mismo tiempo que aumenta la demanda interna.

3.2. Oportunidades

El futuro del mercado del hidrógeno verde es prometedor, con un papel crucial en la transición energética global para la lucha contra el cambio climático y por los avances tecnológicos en el mundo que hacen viable la industria 4.0.

- **Expansión de mercados:** aparecen nuevos mercados y aplicaciones para el hidrógeno verde, incluyendo su uso en generación de energía, almacenamiento a largo plazo, y combustibles sintéticos.

- **Colaboraciones internacionales:** las asociaciones globales contribuyen a acelerar el desarrollo y la implementación de tecnologías de hidrógeno verde.
- **Crecimiento del Mercado Global:** el mercado global de hidrógeno verde crece de manera considerable, impulsado por la creciente demanda de energía limpia y sostenible en sectores industriales clave.
- **Exportaciones Internacionales:** países con abundantes recursos renovables, como Chile, Australia y países del norte de Europa, están posicionándose como potenciales exportadores de hidrógeno verde hacia mercados globales.

3.2.1. Gran potencial de energías renovables de bajo costo

Una de las ventajas del país es su gran potencial de energías renovables baratas de diferentes tecnologías distribuidas en la mayor parte del territorio, que permiten una difusión de esta industria en todas las regiones. Además, el extenso territorio de más de 4000 kilómetros de costa permite obtener agua de mar y su posterior desalinización con energías renovables, industria que no solamente contribuye al desarrollo del hidrógeno sino también a la agricultura, minería, industrias varias y agua potable para la comunidad.

El amplio desarrollo en décadas pasadas de la generación eólica, en distintas zonas del país, contribuyó a la operación de una logística de traslado de piezas de torres y aspas (de decenas de metros de longitud) de los generadores eólicos, a través de caminos existentes y modificados, desembarco de elementos de gran volumen en distintos puertos e instalación de faenas que posteriormente se puede aprovechar en la construcción de plantas de producción de hidrógeno, de amoníaco y de combustibles sintéticos. En especial, la logística de puertos actuales y futuros para el transporte de hidrógeno y amoníaco se favorece con los actuales desarrollos de la logística en la construcción de centrales eólicas.

Para el desarrollo de este potencial de energías renovables de bajo costo es necesario tener una regulación eléctrica que no agregue costos adicionales a los proyectos de fabricación de H₂V, como por ejemplo costos del sistema de transmisión que no son utilizados completamente por estos proyectos. Si no existe la regulación eléctrica adecuada implica que la producción de H₂V se realiza con proyectos aislados del sistema eléctrico nacional con mayor inversión en generación y almacenamiento eléctrico.

3.2.2. Disponibilidad de agua de mar y de plantas desaladoras

Chile es un país con miles de kilómetros de costa por lo que existe disponibilidad de agua de mar, a lo más, a una distancia de pocos centenares de kilómetros en cualquier punto de territorio, lo cual facilita la instalación en todo el territorio nacional de electrolizadores, junto al desarrollo y la potencialidad de las energías renovables, en especial solar y eólica, unida a almacenamiento en baterías en amplias zonas del país permite la construcción de plantas desaladoras aprovechando el agua de mar abundante y electricidad renovable barata para su operación y transporte. Ya existe amplia experiencia en procesos mineros en el norte del país en la captación y utilización de agua de mar.

La tecnología de construcción de plantas desaladoras tiene varios años de ejecución en el país, desde pequeñas plantas para empresas mineras hasta plantas de mayor tamaño para empresas de la gran minería y de multipropósito, por lo tanto, ya se ha recorrido la experiencia de construcción y desarrollo de los permisos respectivos.

También, una fuente adicional de agua para la electrólisis consiste en el tratamiento de aguas servidas de ciudades costeras para su conversión en agua industrial y posteriormente su purificación para la electrólisis, aprovechando la gran cantidad de ciudades costeras sin sistemas de tratamiento de aguas servidas.

3.2.3. Economía abierta

Las políticas europeas de certificación de hidrógeno verde y de energías renovables y las mayores restricciones por cambios fijados para entrar en vigor el año 2030, permiten asegurar la certificación verde de la producción de amoníaco, de metanol y de hidrógeno verde en Chile, por la disponibilidad de energías limpias y de bajo costo que permiten cumplir con las normas de H2V, siempre que el sistema regulatorio eléctrico chileno no agregue costos adicionales a los consumos de electricidad para fabricar H2V.

3.2.4. Yacimientos de hierro y cobre para fabricar minerales verdes

Al disponer el país de abundantes yacimientos de hierro se puede desarrollar la fabricación de hierro verde, utilizando mineral de hierro, hidrógeno verde y la capacidad de energías renovables y agua desalada, tecnologías con desarrollo comercial y de mercados. Todas estas condiciones permiten al país poder realizar inicialmente proyectos piloto y posteriormente una producción a nivel industrial de hierro verde y a partir de estos elementos, la fabricación de acero verde con ventajas comparativas a la producción de acero verde en altos hornos.

3.2.5. Continuidad y profundización de políticas públicas

Como industria nueva a nivel mundial y por la existencia de políticas de asociación pública privada es posible el desarrollo de esta industria de hidrógeno verde, tanto para su aplicación en el país como para la exportación de las tecnologías. Para esto es necesario reconvertir la industria nacional y, principalmente, la reconversión y capacitación de los Recursos Humanos necesarios para generar una cadena de valor en esta nueva industria.

Es necesario el respaldo de los sucesivos gobiernos para dar continuidad a las políticas de reducción de huella de carbono, desarrollo de energías renovables, electrificación, hidrógeno verde y sus derivados, en especial el conocimiento y participación de las comunidades a nivel de los gobiernos regionales y comunales.

La adaptación de las políticas públicas a las nuevas condiciones tecnológicas y de mercado ha sido un aprendizaje en el tiempo para el país y así lograr resultados que fortalezcan la competitividad de nuestro país.

3.2.6. Formación y reconversión de capital humano

El país tiene una gran cantidad de instituciones de educación superior ya sean universidades, centros de formación técnica o institutos profesionales para poder capacitar y reconvertir a distintos profesionales y técnicos, en toda la cadena de desarrollo del hidrógeno verde, incluyendo su producción, transporte, distribución y usos. Esta formación y reconversión se realiza considerando no solamente el mercado nacional, sino también la formación de profesionales y técnicos de otros países.

Se continúa con el financiamiento de los ministerios a la capacitación de profesionales, técnicos, del gobierno central y de regiones en energías renovables e hidrógeno verde, junto con el apoyo al sector privado para la reconversión de técnicos eléctricos, mecánicos, gaseros y químicos en estas nuevas tecnologías.

Es necesario seguir con la formación en estos temas en la educación básica, secundaria y universitaria en todo el país, en especial en las regiones más avanzadas en el desarrollo de la industria del hidrógeno verde.

3.2.7. Corredores marítimos verdes

Los corredores marítimos de baja huella de carbono se desarrollan con barcos que utilizan como combustible amoníaco y metanol verde, en sus primeras etapas y, posteriormente, con hidrógeno verde.

La capacidad exportadora del país en distintos productos mineros, agropecuarios y de manufactura permite construir este tipo de asociación facilitado por la cantidad de puertos con diferentes productos de exportación a distintos mercados y por la producción de hidrógeno, metanol y amoníaco verde a precios menores en las distintas regiones del país junto a la disponibilidad de costa y puertos a lo largo del país.

Para el transporte marítimo internacional abastecido en puertos chilenos se debe mantener una política de transporte marítimo de comercio abierto y sin protecciones a navieras nacionales, unido a una simplificación de trámites y eficiencia en el abastecimiento de los barcos disponiendo de puertos técnicamente adecuados.

3.2.8. Exportación de tecnología, ingeniería y movilidad de recursos humanos

La experiencia en la realización de proyectos piloto y en la construcción de las distintas etapas de los proyectos de gran escala, genera el desarrollo de tecnologías, procesos de ingeniería de distintas especialidades y experiencia de técnicos para poder realizar la transferencia de conocimientos y exportación de tecnología a diferentes países y también la movilidad laboral a otros países.

4

Prospectiva Industria del Hidrógeno Verde

Prospectiva en escenarios futuros globales y en Chile

La industria del hidrógeno verde²⁶ (iH2V) está desarrollándose en varios países como un pilar relevante en la transición hacia el desarrollo económico / social sostenible (economía progresivamente descarbonizada) en competencia y colaboración con el desarrollo de otras industrias.

A medida que los países —sus gobiernos, instituciones y empresas— buscan reducir su huella de carbono y cumplir con los objetivos climáticos, el hidrógeno verde, producido mediante la electrólisis del agua utilizando energía renovable, gana mayor atención y apoyo (significativos algunos de ellos), así como en sus derivados combustibles, amoníaco, metanol y otros productos.

Teniendo presente esto, se presenta el **Cuadro 4.1** que sintetiza los temas abordados en los capítulos 1, 2 y 3 del Informe y que se consideran necesarios como antecedentes para este capítulo 4.

La prospectiva de iH2V que se expone a continuación en las secciones 4.1 y 4.2, utiliza los temas señalados en el **Cuadro 4.1** (así como otros temas). **Esta prospectiva se refiere a las evoluciones posibles de la industria del H2V a escala internacional, con algunas especificaciones para el caso de Chile.** En el capítulo 5 se presenta las dimensiones relevantes de prospectiva para el caso de Chile.

Esto se orienta a lograr la coherencia entre los capítulos 1, 2, 3, 4 y 5 de este Informe.

²⁶ En este informe se usan las denominaciones Hidrógeno Verde e Hidrógeno Limpio.

Cuadro 4.1. Síntesis de temas abordados en capítulos 1, 2 y 3

Contexto actual y tendencias globales

Demanda creciente

- Descarbonización de sectores clave. Industria pesada (minería, acero, cemento) y transporte de larga distancia (camiones, barcos, aviones) necesitan soluciones de descarbonización. El hidrógeno verde se presenta como una opción viable en algunos ámbitos; en otros presenta un potencial de mercado que para ser logrado requiere de avances tecnológicos e inversiones relevantes.
- Políticas y compromisos climáticos. Países, empresas y organizaciones están estableciendo objetivos ambiciosos de reducción de emisiones, impulsando la adopción de tecnologías de hidrógeno (además de otro tipo de tecnologías).

Inversiones y proyectos

- Megaproyectos y Hubs de Hidrógeno. Se están desarrollando proyectos a gran escala en regiones con abundantes recursos renovables, como Chile, Australia, Oriente Medio, Estados Unidos, Europa y otros países de América Latina. Algunos proyectos están justificados por las demandas actuales en los mercados; otros, en cambio, están suponiendo que tales demandas surgirán en el futuro próximo.
- Inversiones en I+D+i. Empresas y gobiernos están invirtiendo en investigación y desarrollo e innovación para mejorar la eficiencia-efectividad de las tecnologías y reducción de los costos de producción, almacenamiento, transporte y uso de hidrógeno verde.

Factores Impulsores

Factores tecnológicos

- Avances en electrólisis. Expectativas de que las tecnologías de electrólisis mejoren en eficiencia-efectividad y disminuyan en costo, así como en tecnologías de almacenamiento, transporte y uso.
- Integración con energías renovables. La expansión de las capacidades de energía solar y eólica junto con el almacenamiento se proyectan como medios relevantes que proporcionan la electricidad necesaria para producir hidrógeno verde de manera sostenible, así como, la biomasa proveniente del ámbito agrícola.

Factores económicos

- Reducción de costos. Se proyecta una disminución significativa en los costos de producción de hidrógeno verde debido a economías de escala, avances tecnológicos y reducción en los costos de energías renovables. Es necesario un análisis de la potencial disminución de costos de transporte y uso del H₂V.
- Incentivos y subsidios. Políticas y subsidios gubernamentales pueden lograr que el hidrógeno verde sea más competitivo frente a alternativas fósiles (y otras). Esto ya se expresa en algunos países.

Factores normativos - regulatorios y políticos

- Normativas de emisiones. Se requieren regulaciones más estrictas sobre emisiones de carbono que incentivan el uso de hidrógeno verde.
- Acuerdos Internacionales. El Acuerdo de París y otras asociaciones internacionales promueven la colaboración, el intercambio y colaboración en el desarrollo de tecnologías en hidrógeno verde.

Desafíos y Oportunidades

Desafíos

- Infraestructura y medios de uso. La infraestructura de transporte, almacenamiento y distribución de hidrógeno, así como los medios de uso necesitan desarrollarse significativamente.
- Costos. Aunque los costos están disminuyendo, el hidrógeno verde aún es más caro que las alternativas basadas en combustibles fósiles.
- Seguridad. El manejo y almacenamiento de hidrógeno verde requiere realizar gestión de alta seguridad con regulaciones y estándares adecuados.

Oportunidades

- Expansión de mercados. Están emergiendo nuevos mercados y aplicaciones para el hidrógeno verde, incluyendo su uso en generación de energía, almacenamiento con mayor duración, aplicaciones industriales (amoníaco y otros productos) y combustibles sintéticos.
- Colaboraciones internacionales. Las asociaciones globales contribuyen a acelerar el desarrollo y la implementación de tecnologías de hidrógeno verde. En particular, por la articulación de los mercados y el desarrollo de capacidades.

Fuente: Elaboración propia de la comisión.

La prospectiva se presenta estructurada en dos escenarios que tienen mejores desarrollos que el escenario base²⁷:

- **Desarrollo Acelerado** (sección 4.1) caracterizado por la solución de todas las tensiones de cambio señaladas más abajo.
- **Desarrollo Moderado** (sección 4.2) caracterizado por la solución de 2 de las tensiones de cambio (costos competitivos, atracción de inversiones) aunque no todas.

Estos escenarios se estructuran usando dimensiones relevantes: económica, capital humano, infraestructura integral, tecnológica, regulaciones y política activa, prospectiva de ingeniería chilena.

Como **insumos principales para la prospectiva** se consideran:

- Los planteamientos presentados en los capítulos 1, 2 y 3 de este informe.
- Las dinámicas de origen y de evolución de la industria del H2V.
- Algunas proyecciones seleccionadas.

²⁷ El escenario base corresponde al desarrollo de la industria en la modalidad “*business as usual*” con dinámicas principalmente reactivas. Los escenarios de Desarrollo Acelerado y Desarrollo Moderado suponen dinámicas con diferentes grados de anticipación y proactividad en el desarrollo de la industria.

Las dinámicas de origen y evolución de la iH2V son clave para el desarrollo futuro de la industria del H2V debido a que algunas de sus tensiones internas y externas aún no están resueltas a escala internacional.

Estas **tensiones de cambio** están principalmente asociadas al desarrollo de la demanda efectiva de H2V:

- **TC.1** Desarrollo hacia costos competitivos de las tecnologías para producir, almacenar, transportar, distribuir y usar H2V respecto de los costos de otros combustibles (gas, hidrógeno gris, otras), tipos de energía y productos industriales, haciendo viable la producción, comercialización y adopción de H2V en forma rentable y sostenible.
- **TC.2** Ventajas y desventajas comparativas de diferentes territorios para la producción de H2V, y ventajas competitivas en toda la cadena de valor del H2V. Por ejemplo, en **Cuadro 4.2** se presentan algunas ventajas de Chile y Australia para el desarrollo de la industria del H2V.
- **TC.3** La voluntad política y las capacidades efectivas de los países para abordar y cumplir los acuerdos de descarbonización y la generación de respuestas efectivas al cambio climático. En particular, para no sobrepasar el incremento de 1,5 °C en la temperatura promedio global de la atmósfera en el planeta como consecuencia de la generación de GEI²⁸.
- **TC.4** La atracción de inversiones —públicas y privadas— a escala suficiente para el desarrollo de la industria del H2V.
- **TC.5** Desarrollo de tecnologías que aumentan la efectividad de las industrias competidores con iH2V. En particular, desarrollo acelerado de tecnología y disminución de costos de baterías (estimado actualmente en 20% anual), y todos los componentes que permiten generar y almacenar energía eléctrica.

Las principales **proyecciones** consideradas la prospectiva de la iH2V son:

- Proyección de costo de producción de H2V (**Figura 4.1**)²⁹
- Necesidad de disminución de los GEI (**Figura 4.2**)³⁰
- Crecimiento de la industria del H2V en la dinámica de Transformación Sostenible (**Figura 4.3**)³¹ en comparación con las dinámicas de crecimiento moderado o crecimiento lento.

²⁸ GEI: gases de efecto invernadero.

²⁹ The Clean Hydrogen Opportunity for Hydrocarbon Rich Countries. McKinsey & Company. November 2022.

³⁰ Global Energy Perspective. McKinsey & Company. September 2024.

³¹ Global Energy Perspective. McKinsey & Company. September 2024.

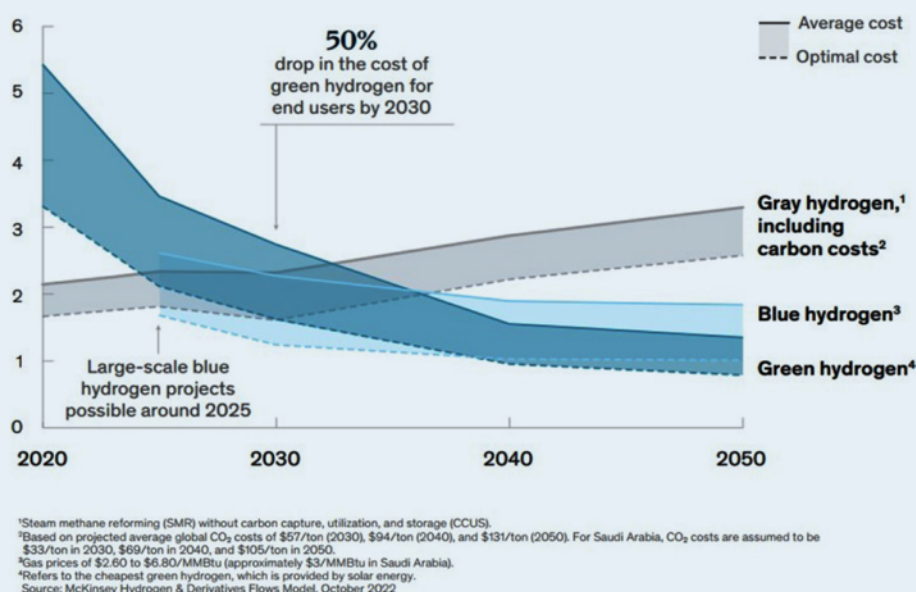


Figura 4.1. Proyección de costo de producción del H2V. Hacia 2030 se proyecta que el costo medio de producción de H2V disminuya aproximadamente un 50%. Hacia 2040 se proyecta que el costo medio de producción de H2V se equilibra con el de H2 Azul.

Fuente: The clean hydrogen opportunity for hydrocarbonrich countries, McKinsey&Company, noviembre 2022.

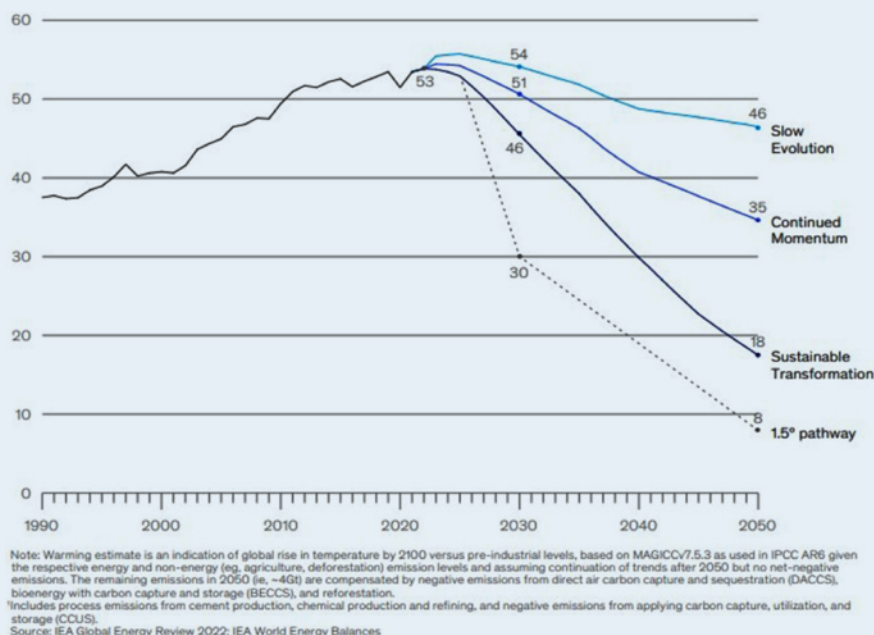


Figura 4.2. Necesidad de disminución de los GEi. La transformación sostenible requiere disminuir aproximadamente un 30% la GEi hacia 2040. Y un 70% para cumplir el límite de 1,5° C.

Fuente: Global Energy Perspective. McKinsey & Company. September 2024.

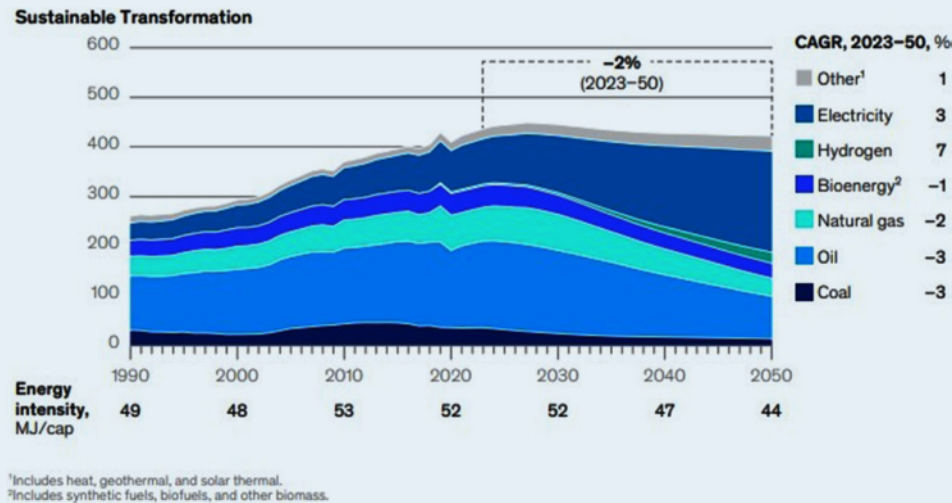


Figura 4.3. Crecimiento de industria del H2V en dinámica de Transformación Sostenible. En la Transformación Sostenible, se proyecta que la: Industria del H2V tiene el crecimiento mayor (7% anual); electricidad será la principal fuente de energía.

Fuente: Global Energy Perspective 2004, McKinsey&Company, Septiembre 2024.

Cuadro 4.2. Ventajas internacionales para el desarrollo de la Industria del Hidrógeno Verde en Chile y Australia

Aspecto	Chile	Australia
Recursos naturales	Abundantes recursos renovables disponibles: solar y eólico.	Amplias áreas de terreno y recursos renovables disponibles (solar, eólico y geotérmico).
Ubicación geográfica	Acceso a mercados asiáticos (Asia-Pacífico), proximidad en América Latina y exportación a Europa y América del Norte.	Acceso a mercados en Asia y exportación a Europa y otros países.
Políticas de apoyo	Compromiso gubernamental con la descarbonización y el desarrollo del H2V. Iniciativas de apoyo acotado.	Estrategias gubernamentales y apoyo amplio para el desarrollo del H2V.
Inversión extranjera	Interés relevante de inversionistas internacionales en la industria del H2V. Primeras inversiones en curso.	Interés de inversionistas. Inversión realizada en infraestructura y proyectos de H2V.
Desarrollo de infraestructura	Inicio de desarrollo de infraestructura para producción y exportación de H2V.	Infraestructura avanzada para la producción y transporte de H2V.

Fuente: Elaboración propia de la Comisión.

En síntesis, el **desarrollo de la industria del H2V** está basada en los siguientes considerandos:

- **La industria del H2V es parte de la transformación mayor de la descarbonización de la economía.**
A la descarbonización también concurren la electrificación de los consumos, electromovilidad, la industria del litio y otros ámbitos (cobre “verde”). Estas industrias están evolucionando al demostrar progresivamente mayor viabilidad - efectividad - rentabilidad - sostenibilidad que otras.
- **Los usos del hidrógeno verde se irán diversificando y profundizando, escalando en los mercados.**
Esto es consecuencia tanto de las dinámicas de descarbonización y las expectativas de disminución de costos, así como de los desempeños del H2V en diferentes usos (producción de fertilizantes y otros, además de combustible), en usos tanto actuales como nuevos.
- **Aumentarán los desarrollos tecnológicos para hacer eficiente la inversión y la producción - almacenamiento - distribución de H2V, así como de sus usos diversos.**
Estos desarrollos tecnológicos son tanto mejoramientos de las tecnologías actuales como innovaciones tecnológicas incrementales y disruptivas. Las tecnologías actuales son insuficientes para sostener la industria del H2V en forma plenamente competitiva en los mercados internacionales (al menos como combustible), sin necesidad de subsidios (como ocurre en Europa y EUA).

4.1. Escenario³² de Desarrollo Acelerado

Este escenario se origina considerando que las 4 primeras tensiones de cambio (TC1 a TC4) —señaladas más arriba— se resuelven simultáneamente y, asimismo, que los avances tecnológicos en la iH2V superen a los avances tecnológicos —posiblemente acelerados— de las industrias competidoras (TC5).

Es caracterizado por los elementos de prospectiva organizados en las siguientes dimensiones a escala internacional. Algunos elementos de prospectiva para la industria del H2V en Chile se presentan en forma específica al final de este capítulo, utilizando la prospectiva internacional, en forma completa en el capítulo 5.

³² La redacción de los escenarios de futuro se realiza en tiempo presente como modalidad de visualización.

4.1.1. Dimensión económica

Global

Adopción amplia y rápida del hidrógeno verde en sectores industriales y de transporte. Principalmente **impulsada por políticas activas, demostración de competitividad del H2V, desarrollo de mercados y reducción significativa de costos.**

Reducción de costos

Expectativa de una disminución significativa en los costos de producción - almacenamiento - transporte - distribución - uso del hidrógeno verde. Esto basado en la escalabilidad de las tecnologías más eficientes y en la reducción de los costos de las energías renovables (solar y eólica).

Se proyecta que el precio del hidrógeno verde se sitúe bajo³³ de los US\$2 / kg para 2030 y continúe disminuyendo hacia 2035-2040.

Inversión masiva

Las **empresas y gobiernos de diversos países invierten significativamente** en infraestructura, electrolizadores y otros equipamientos, capacidades de almacenamiento y distribución de hidrógeno y en los usos diversos.

Esto basado en la voluntad política y compromiso de los gobiernos, así como del potencial de negocios de la industria del H2V (rentabilidad articulada con sustentabilidad).

Se proyecta que la inversión total³⁴ en la cadena de suministro del hidrógeno verde alcance entre US\$200.000 millones y US\$500.000 millones hacia 2040.

Consumo y mercados

- **Demanda global masiva.** La demanda de hidrógeno verde crece rápida y significativamente³⁵, impulsada por sectores difíciles de descarbonizar integralmente con otros medios. Como la minería, la industria pesada (siderurgia, producción de cemento, fabricación de productos químicos) y el transporte pesado (camiones grandes, aviones, barcos).

³³ The Clean Hydrogen Opportunity for Hydrocarbon Rich Countries. McKinsey & Company. November 2022.

³⁴ The Hard Stuff. Navigating the physical realities of the energy transition. McKinsey Global Institute. August 2024.

³⁵ The Clean Hydrogen Opportunity for Hydrocarbon Rich Countries. McKinsey & Company. November 2022.

- **Expansión de mercados.** Los mercados internacionales se expanden con exportaciones de hidrógeno verde desde países con abundantes fuentes de energías renovables como Chile, Australia, España, países del Medio Oriente y con exportaciones hacia diversos países, entre ellos de Europa, Japón y Corea del Sur.

Competencia internacional entre empresas participantes en la industria H2V

- **Aumento de competencia internacional³⁶ entre empresas** de diversos países que concurren en la industria del H2V.
Esto en diversas fases de inversión y desarrollo. Desde inversionistas de capital hasta empresas productivas, comercializadoras y operadoras.
Esta competencia internacional genera aprendizajes sobre cómo es mejor invertir y desarrollar esta industria, generando ventajas competitivas en algunas de las empresas participantes. Pero, debido a la magnitud del mercado y a los continuos cambios tecnológicos, es necesario superar eventuales situaciones oligopólicas.
- **Impacto de la competencia internacional en la eficiencia** productiva, de transporte, de almacenamiento y de uso en la cadena de valor de la industria del H2V.
Considerando que la rentabilidad y la sostenibilidad de esta industria dependen significativamente de disponer oportunamente de tecnologías adecuadas, la competencia internacional conduce a una mayor eficiencia en las cadenas de valor con menores costos esperados, lo que a su vez favorece más usos del H2V.

4.1.2. Dimensión de competencia de H2V con combustibles fósiles y otras opciones³⁷

Global

En el futuro cercano, se logra competitividad suficiente de la industria del hidrógeno verde³⁸ respecto de los combustibles fósiles y otras industrias competidoras, generándose progresivamente espacios de mercado en que prevalece el H2V y otros espacios de mercado en que dominan otras industrias (combustibles, por ejemplo).

³⁶ The Hard Stuff. Navigating the physical realities of the energy transition. McKinsey Global Institute. August 2024.

³⁷ Global Energy Perspective. McKinsey & Company. September 2024.

³⁸ Global Energy Perspective. McKinsey & Company. September 2024.

Desplazamiento acelerado de los combustibles fósiles en algunos ámbitos

El hidrógeno verde reemplaza significativamente³⁹—en el futuro cercano— a los combustibles fósiles en sectores industriales y de transporte pesado.

El precio competitivo que logre el hidrógeno verde, junto con las políticas de eliminación de GEI, limita el uso de combustibles fósiles.

Mayor rentabilidad respecto de hidrógeno azul

El hidrógeno verde logra más rentabilidad que el gas natural con captura de carbono (hidrógeno azul)⁴⁰ a medida que los precios de las energías renovables continúan bajando.

4.1.3. Dimensión infraestructura integral⁴¹

Desarrollo (diseño, implementación, operación) de infraestructura integral en la cadena de valor de la industria del H2V

Incluyendo plantas industriales, medios de transporte, redes de tuberías, equipamiento para almacenamiento, estaciones de servicio y otros medios de uso.

Concepción de la infraestructura integral con mínimo impacto ambiental y social

De modo aceptable para las comunidades de los entornos relevantes en los países, de acuerdo con los mejores estándares internacionales.

Acceso eficiente de diversas empresas productivas, de transporte y otras a la infraestructura integral

Esto para lograr mayores economías de escala, menores costos y disminución de impactos negativos en los entornos territoriales y sociales.

³⁹ Global Energy Perspective. McKinsey & Company. September 2024.

⁴⁰ Global Energy Perspective. McKinsey & Company. September 2024.

⁴¹ The Clean Hydrogen Opportunity for Hydrocarbon Rich Countries. McKinsey & Company. November 2022.

4.1.4. Dimensión tecnológica⁴²

Inversión en I+D e innovación

La inversión en investigación y desarrollo e innovación —tanto pública como privada— aumenta significativamente respecto de 2025 y sigue siendo fundamental para mejorar la eficiencia de producción, reducir costos y desarrollar nuevas aplicaciones y usos del hidrógeno verde, como el almacenamiento estacional de energía y la integración con sistemas energéticos descentralizados.

Resultados de las innovaciones tecnológicas

Las innovaciones y otros avances tecnológicos en electrólisis y en infraestructuras de almacenamiento y distribución logran en el futuro cercano que el hidrógeno verde sea significativamente más eficiente y competitivo, facilitando los diversos tipos de uso. Las tecnologías de celdas de combustible y baterías avanzadas maduran rápidamente.

Escalabilidad

Los avances tecnológicos logran en el futuro cercano que los sistemas de producción de hidrógeno verde a escala GW sean comunes.

Con ello se reducen los costos y se mejora la eficiencia energética.

Articulación de tecnologías con modelos industrial 4.0, modelos de negocios avanzados

Se implementan en el futuro cercano unos modelos de negocios y de políticas públicas de nueva generación, aptos para el desarrollo rápido y amplio de la industria H2V, apalancando con efectividad la i4.0 y sus familias de tecnologías (incluyendo la IA).

⁴² Global Energy Perspective. McKinsey & Company. September 2024.

4.1.5. Dimensión de regulaciones y políticas activas⁴³

Políticas audaces de incentivos

Los gobiernos de los países más comprometidos con la descarbonización acelerada implementan políticas audaces y robustas de incentivos (subsidios, créditos fiscales y otras modalidades) para el desarrollo de la industria del hidrógeno verde.

Esto unido con regulaciones obligatorias de descarbonización y eliminación gradual de los combustibles fósiles.

Estándares internacionales

Se conciben, diseñan e implementan estándares internacionales para el hidrógeno verde, creando sinergia entre los países, facilitando el comercio global.

Los acuerdos internacionales (bilaterales y multilaterales) fomentan la armonización de regulaciones y estándares entre países.

4.1.6. Dimensión de capital humano

El capital humano es una dimensión crítica para el desarrollo de iH2V, por su importancia decisiva para hacer viable esta industria y para proyectarla competitivamente en este Escenario de Desarrollo Acelerado.

Para ello se **proyectan nuevos conocimientos y competencias que las personas deben tener en diferentes roles y funciones**. Entre ellos:

- Desarrolladores e implementadores de inversiones —rentables y sostenibles— en los diversos eslabones de las cadenas de valor de iH2V.
- Desarrolladores e implementadores de políticas públicas de calidad adecuadas para el desarrollo de la iH2V.
- Ingenieros, otros profesionales y técnicos diversos en número suficiente y con las competencias adecuadas para las diversas fases de la iH2V: desde los diseños, las ingenierías básicas y de detalle hasta la construcción, implementación, operación y mantenimiento de las infraestructuras (plantas productivas, entidades de almacenamiento y distribución, entidades de transporte y entidades de uso). Todo esto con criterios simultáneos de desempeño económico, ambiental y social.

⁴³ The Clean Hydrogen Opportunity for Hydrocarbon Rich Countries. McKinsey & Company. November 2022.

- Ingenieros y otros profesionales especialistas en tecnologías i4.0 (analítica avanzada, IA, simuladores, IoT, automatización y sistemas autónomos, plataformas avanzadas y otras tecnologías digitales, así como tecnologías de materiales y de energía).
- Investigadores, desarrolladores tecnológicos e innovadores en número suficiente y con las competencias adecuadas para abordar oportunamente las necesidades de I+D+i para la iH2V.
- Emprendedores innovadores para desarrollar dispositivos, equipos y sistemas que aumentan la competitividad sostenible de la iH2V, y se desenvuelven internacionalmente. En algunos casos, configurando nuevas industrias.

Lo anterior implica: hubs de atracción y retención de capital humano, desarrollo de competencias de profesionales y técnicos que se desenvuelven en diversas industrias (*upskilling*), renovación y ampliación formativa en las IES, nuevas rutas de ejercicio laboral, proyección internacional.

4.1.7. Ámbito de prospectiva: industria del H2V en Chile

En el **Escenario de Desarrollo Acelerado para H2V en Chile**, aplican también las dimensiones señaladas anteriormente para la escala internacional.

Aunque con las siguientes consideraciones específicas:

- Desarrollo acelerado del mercado interno en aquellos usos en que el H2V tiene ventajas respecto de otros combustibles y usos.
- Demostración de competitividad de Chile respecto de otros países considerando producción - almacenamiento - transporte - distribución y uso del H2V.

Chile cuenta con un Plan de Acción de H2V 2023-2050⁴⁴, publicado en 2024 por el gobierno y en cuyo desarrollo concurrieron el Ministerio de Energía, Ministerio de Economía, Ministerio de Medio Ambiente, CORFO, Programa de Desarrollo Sostenible y otros actores públicos y privados.

Algunas de las iniciativas de este plan pueden considerarse como propias de este Escenario de Desarrollo Acelerado, aunque la mayoría de ellas corresponden más bien al Escenario de Desarrollo Moderado.

⁴⁴ Plan de Acción Hidrógeno Verde 2023-2030. Gobierno de Chile, Ministerio de Energía. Abril 2024.

En las figuras de este Plan de Acción se puede apreciar la imagen de escenario de futuro, así como las líneas de acción para abordarlo (hoja de ruta).

4.1.8. Ámbito / dimensión de prospectiva de ingeniería originada en Chile y asociada a la industria del H2V

En el Escenario de Desarrollo Acelerado, la **ingeniería originada⁴⁵ en Chile tiene un potencial realmente significativo por las oportunidades que genera la demanda acelerada** en: desarrollos tecnológicos, diseños, ingenierías básicas y de detalle, gestión de proyectos de construcción e implementación, servicios de operación y mantenimiento, incluyendo especialmente sistemas de industria 4.0.

En contextos competitivos internacionales con empresas tecnológicas y de ingeniería de diversos países (principalmente de aquellos que ya cuentan con capacidades importantes de ingeniería y que se comprometen con el desarrollo del H2V).

Estas oportunidades consideran:

- Necesidades tecnológicas, de ingeniería y servicios asociados para el desarrollo, operación, mantenimiento y actualización progresiva de la industria a nivel regional y nacional, apalancando espacios de especialización y modelos de negocios adecuados.
- Necesidades similares en otros países a los cuales pueden concurrir oportunamente las empresas de ingeniería y tecnología originadas en Chile.
Esto como un proceso de internacionalización rápido —más allá de la exportación— proyectando la experiencia y las ventajas competitivas que se generen tempranamente.
- Necesidades tecnológicas, de ingeniería y servicios asociados para el uso del H2V en distintos ámbitos (industriales, de transporte) y en diferentes países.
Esto como un proceso de desarrollo global de la ingeniería.

⁴⁵ Esto incluye tanto la ingeniería generada por profesionales chilenos como por profesionales extranjeros que se radican en el país para participar en el desarrollo de la industria del H2V.

4.2. Escenario de Desarrollo Moderado

Este escenario se origina considerando que se resuelven 2 de las 4 tensiones de cambio (costos competitivos, atracción de inversiones). Y se basa principalmente en el desarrollo orgánico de los mercados sin necesidad de políticas públicas disruptivas⁴⁶ o modelos de negocios muy audaces.

Es caracterizado por los elementos de prospectiva organizados en las siguientes dimensiones a escala internacional. Unos elementos de prospectiva para la industria del H2V en Chile se presentan en forma específica al final, utilizando la prospectiva internacional y, en forma completa, en el capítulo 5.

4.2.1. Dimensión económica

Global

Adopción creciente pero moderada del hidrógeno verde en algunos sectores industriales y de transporte en los cuales tiene claras ventajas respecto de otros productos. Principalmente **impulsada por políticas públicas favorables (aunque no disruptivas), casos de negocios evidentemente positivos del H2V, desarrollo de mercados en que el H2V tiene ventajas y reducción moderada de costos (suficiente para negocios sustentables).**

Reducción de costos

Disminución moderada en los costos de producción - almacenamiento - transporte - distribución - uso del hidrógeno verde, en magnitudes suficientes para lograr sustentabilidad de los negocios. Esto basado en algunas tecnologías más eficientes de los modelos de gestión y reducción de los costos de las energías renovables (solar y eólica).

Inversión selectiva

Empresas y gobiernos de diversos países invierten selectivamente en algunas infraestructuras y equipamientos suficientes para abordar una demanda moderada en los mercados, evitando riesgos mayores, incluyendo: electrolizadores, otros equipamientos, capacidades de almacenamiento y distribución de hidrógeno.

⁴⁶ Principalmente, políticas de subsidios significativos al uso de H2V en la descarbonización de la industria y el transporte.

Asimismo, con la inversión adecuada en los usos seleccionados por sus beneficios evidentes en particular en plazos breves.

Esto considerando una voluntad política moderada y un compromiso selectivo de los gobiernos, así como el potencial de negocios de la industria del H2V en los mercados y productos seleccionados por tener buena rentabilidad (articulada con sustentabilidad).

Consumo y mercados

- **Demanda global moderada y selectiva.** La demanda de hidrógeno verde crece moderada y selectivamente, impulsada por casos de negocios en que es evidente su rentabilidad y su sustentabilidad, con foco en la contribución a descarbonizar.
- **Desarrollo de mercados.** Los mercados internacionales se desarrollan moderadamente basados en la rentabilidad sustentable del uso de H2V, sin necesidad de políticas públicas disruptivas en los países⁴⁷. Las abundantes fuentes en energías renovables de bajo costo relativo en algunos países —como Chile— facilitan las exportaciones de hidrógeno verde hacia países con demandas explícitas.

Competencia internacional entre empresas participantes en la industria H2V

- **Aumento moderado de competencia internacional entre empresas** de diversos países que concurren en la industria del H2V.
Esto en las fases de inversión y desarrollo más rentables y menos riesgosas, principalmente en algunos inversionistas de capital y empresas productivas que logran compromisos comerciales tempranos y convenientes en los mercados de destino.
Esta competencia internacional se focaliza en las oportunidades de negocios más evidentes, con las empresas, asegurando las rentabilidades y los organismos públicos verificando el desarrollo económico sostenible. Y todos ellos evaluando y preparándose para proyectarse luego en mercados más complejos.
- **Impacto parcial de la competencia internacional en la eficiencia** productiva, de transporte, de almacenamiento y de uso en la cadena de valor de la industria del H2V.
Principalmente en desarrollo o mejoramiento de algunas tecnologías necesarias, tanto para menor costo de producción y distribución como para uso de H2V en algunas industrias y medios de transporte, y sin requerir necesariamente innovaciones disruptivas.

⁴⁷ Aunque algunos países puedan hacerlo selectivamente asociado al uso de H2V.

4.2.2. Dimensión de competencia de H2V con combustibles fósiles y otras opciones

Global

A mediano y largo plazo, **se logra competitividad suficiente de la industria del hidrógeno verde respecto de los combustibles fósiles y otras industrias competidoras**, aunque no se logra en el corto plazo en este escenario, salvo en los casos de negocios seleccionados en que son evidentes las ventajas del H2V. Estos primeros casos facilitan la generación de mayores espacios de mercado para el H2V.

Desplazamiento parcial y moderado de los combustibles fósiles en algunos ámbitos

El hidrógeno verde reemplaza parcial y moderadamente a los combustibles fósiles en algunos sectores industriales y de transporte pesado en que se verifican sus ventajas respecto de otras opciones.

El precio competitivo que logre el hidrógeno verde en algunos usos en los mercados de destino, junto con algunas políticas favorables, es determinante en la sustitución de combustibles fósiles.

Mayor rentabilidad respecto de hidrógeno azul en el mediano y largo plazo.

El hidrógeno verde logra más rentabilidad que el gas natural con captura de carbono (hidrógeno azul) en el mediano y largo plazo. Esto, a medida que los precios de energías renovables continúen bajando y otros factores de producción.

4.2.3. Dimensión infraestructura básica

Desarrollo (diseño, implementación, operación) de infraestructura básica en la cadena de valor de la industria del H2V

Se logra al considerar la infraestructura básica y crítica para producir y distribuir H2V para los casos de negocios seleccionados (por rentabilidad sostenible y riesgo moderado). Incluyendo selectivamente algunas plantas industriales, medios de transporte, redes de tuberías, equipamiento para almacenamiento, estaciones de servicio y otros medios de uso.

Concepción de la infraestructura básica con impacto ambiental y social más tolerable que las soluciones existentes

Esto ocurre de modo aceptable para las comunidades del entorno relevante, aunque no necesariamente sea el mínimo impacto. Eso sí, considerando algunos de los mejores estándares internacionales.

Acceso de empresas productivas, de transporte y otras a la infraestructura básica

Esto para lograr algunas economías de escala, algunos menores costos e impactos acotados en los entornos territoriales y sociales.

4.2.4. Dimensión tecnológica

Inversión en I+D e innovación

La inversión en investigación y desarrollo e innovación —tanto pública como privada— se focaliza en mejoramiento y desarrollo de tecnologías necesarias para mejorar la eficiencia de producción y distribución, para reducir costos y lograr usos efectivos del hidrógeno verde demostrando los beneficios.

También, aunque en menor grado, en I+D+i para desarrollo de nuevas aplicaciones de H₂V, almacenamiento estacional de energía y la integración con sistemas energéticos descentralizados.

Resultados de las innovaciones tecnológicas

Algunas innovaciones —principalmente incrementales— y mejoramientos tecnológicos en electrólisis y en infraestructuras de almacenamiento y distribución logran en el futuro cercano que el hidrógeno verde sea más eficiente y competitivo, facilitando algunos usos más evidentes. Aunque todavía las innovaciones no son suficientes para crear una ventaja decisiva del H₂V, como por ejemplo, algunos desarrollos de tecnologías de celdas de combustible y de baterías avanzadas, que todavía no alcanzan su madurez.

Escalabilidad parcial

Los avances tecnológicos logran en el futuro que existan algunos sistemas de producción de hidrógeno verde a escala de GW. Aunque todavía no sea una práctica común en la industria permite reducir los costos y se mejora la eficiencia energética.

Articulación de tecnologías con modelos industrial 4.0, modelos de negocios avanzados

Se implementan en el futuro cercano unos primeros modelos de negocios y de políticas públicas de desarrollo productivo sostenible aptos para la industria H2V.

Apalancando algunas de las potencialidades de la i4.0 (principalmente, efectividad en las cadenas de valor) y algunas tecnologías promisorias (incluyendo IA).

4.2.5. Dimensión de regulaciones y políticas públicas

Políticas de incentivos

Algunos gobiernos de los países más comprometidos con la descarbonización implementan políticas públicas de incentivos selectivos para el desarrollo de la industria del hidrógeno verde. Principalmente, para favorecer algunos usos de mayor impacto a la vez que de riesgo controlado en la obtención de resultados.

Esto unido con algunas regulaciones selectivas para inducir la descarbonización en algunos sectores.

Estándares internacionales

Se conciben, diseñan e implementan algunos primeros estándares internacionales básicos para el hidrógeno verde, facilitando el comercio global.

Algunos acuerdos internacionales (bilaterales y multilaterales) fomentan la armonización de regulaciones y estándares entre países. Aunque solo en ámbitos de más fácil acuerdo entre los países.

4.2.6. Dimensión capital humano

El **capital humano es una dimensión relevante para el desarrollo de iH2V**, por su importancia para hacer viable esta industria y proyectarla competitivamente en este Escenario de Desarrollo Moderado.

Para ello se **proyectan nuevos conocimientos y competencias de las personas en diferentes roles y funciones**. Entre ellos:

- Desarrolladores e implementadores de inversiones —rentables y sostenibles— en los eslabones de las cadenas de valor de iH2V que son necesarios para abordar los primeros mercados y productos.

- Desarrolladores e implementadores de políticas públicas de calidad adecuadas para las iniciativas iH2V de este Escenario.
- Ingenieros, otros profesionales diversos y técnicos en número suficiente para las fases de la iH2V que son relevantes en este Escenario: desde ingenierías básicas y de detalle hasta la construcción, implementación, operación y mantenimiento de las infraestructuras, plantas productivas —entidades de almacenamiento, transporte y distribución— y entidades de uso, con criterios viables de desempeño económico, ambiental y social.
- Ingenieros y otros profesionales especialistas en algunas tecnologías i4.0 que sean más relevantes para este Escenario (analítica avanzada, IA, simuladores, IoT, automatización y sistemas autónomos, plataformas avanzadas y otras tecnologías digitales, así como tecnologías de materiales, de energía).
- Investigadores, desarrolladores tecnológicos e innovadores en número suficiente para abordar oportunamente las necesidades de I+D+i para este Escenario de desarrollo de la iH2V.
- Emprendedores e innovadores para desarrollar dispositivos, equipos y sistemas que aumentan la competitividad sostenible de la iH2V, y se desenvuelven internacionalmente. Al menos, en los nichos de mayor valor y riesgo controlado. Eventualmente, siendo pioneros de nuevas industrias.

Lo anterior implica: hubs parciales de atracción y retención de capital humano, desarrollo de competencias de profesionales y técnicos que se desenvuelven en diversas industrias (*upskilling*), renovación y ampliación formativa en las IES, nuevas rutas de ejercicio laboral en los ámbitos de este Escenario y proyección internacional.

4.2.7. Ámbito de prospectiva: industria del H2V en Chile

En el **Escenario de Desarrollo Moderado para H2V en Chile**, aplican las dimensiones señaladas anteriormente para la escala internacional.

Aunque con las siguientes consideraciones específicas:

- Desarrollo del mercado interno en aquellos usos en que el H2V tiene ventajas evidentes respecto de otros productos.
- Demostración de competitividad de Chile respecto de otros países considerando producción - almacenamiento - transporte y distribución para los usos rentables y sostenibles de H2V.

Chile cuenta con un Plan de Acción de H2V 2023-2050, publicado en 2024 por el gobierno y en cuyo desarrollo concurrieron el Ministerio de Energía, Ministerio de Economía, Ministerio de Medio Ambiente, Programa de Desarrollo Sostenible, CORFO y otros actores públicos y privados.

La mayoría de las iniciativas de este plan pueden considerarse asociadas al Escenario de Desarrollo Moderado.

4.2.8. **Ámbito/dimensión de prospectiva de ingeniería originada Chile y asociada a la industria del H2V**

En el Escenario de Desarrollo Moderado, **la ingeniería originada⁴⁸ en Chile tiene un potencial valioso —aunque no necesariamente masivo— por las oportunidades que genera la demanda moderada**. Esto se da en: desarrollos tecnológicos, diseños, ingenierías básicas y de detalle, gestión de proyectos de construcción e implementación, servicios de operación y mantenimiento, en particular, incluyendo sistemas de industria 4.0.

Esto en contextos competitivos internacionales con empresas tecnológicas y de ingeniería de algunos países (principalmente de aquellos que ya cuentan con capacidades importantes de ingeniería y que se comprometen con el desarrollo del H2V).

Estas oportunidades consideran:

- Necesidades tecnológicas, de ingeniería y servicios asociados para el desarrollo, operación, mantenimiento y actualización progresiva de la industria a nivel regional y nacional.
- Apalancando espacios de especialización y modelos de negocios más adecuados.
- Necesidades similares en otros países a los cuales pueden concurrir oportunamente las empresas de ingeniería y tecnología originadas en Chile, principalmente, en ámbitos de nicho.
- Esto como un proceso de internacionalización moderado —más allá de la exportación— proyectando la experiencia y las ventajas competitivas que se generen tempranamente.
- Necesidades tecnológicas, de ingeniería y servicios asociados para el uso del H2V en distintos ámbitos (industriales, de transporte) en que se verifique simultáneamente rentabilidad y sostenibilidad.
- Esto como parte de un incipiente proceso de desarrollo global de la ingeniería.

⁴⁸ Esto incluye tanto la ingeniería generada por profesionales chilenos como por profesionales extranjeros que se radican en el país para participar en el desarrollo de la industria del H2V.

4.3. Comparación de escenarios

En esta sección se presenta el **Cuadro 4.3** comparativo de los escenarios de Desarrollo Acelerado y Desarrollo Moderado de la industria del hidrógeno verde (iH2V) presentados en las secciones 4.1 y 4.2. Ésta se ha generado aplicando la herramienta ChatGPT a ambos escenarios para que extraiga la información pertinente. Y luego ajustada y complementada.

Diferenciación global de los escenarios.

1. **Desarrollo Acelerado.** Chile y otros países con ventajas naturales lideran la industria del H2V globalmente, con inversiones masivas, rápida reducción de costos y un fuerte desplazamiento de combustibles fósiles, requiriendo altas inversiones y muy buena coordinación público-privada.
2. **Desarrollo Moderado.** Avance más prudente, priorizando inversiones financieramente más seguras en sectores estratégicos, con riesgo de rezago frente a mercados globales más agresivos.

En el **Cuadro 4.3** se puede apreciar la imagen de escenario de futuro de este Plan de Acción, así como las líneas de acción para abordarlo (hoja de ruta).

Cuadro 4.3. Comparativa: Escenarios de Desarrollo de la industria del Hidrógeno Verde a escala global y consideraciones en Chile

Dimensión	Escenario de Desarrollo Acelerado	Escenario de Desarrollo Moderado
Velocidad de crecimiento	Expansión acelerada del sector H2V con múltiples proyectos simultáneos a gran escala. Muchos rentabilizados debido a los subsidios y otras políticas.	Crecimiento progresivo con pocos proyectos estratégicos, priorizados en sectores específicos que tienen rentabilidad orgánica de mercado.
Demanda interna en Chile (y otros países exportadores)	Alta adopción en usos masivos en industria y transporte. Incluyendo, minería, siderurgia y transporte.	Adopción limitada en sectores específicos con ventajas para el H2V. Por ejemplo, algunos usos en minería, transporte pesado y otros.
Demanda externa (exportaciones)	Chile y otros pocos países se posicionan como líderes globales en exportación de H2V y derivados (amoníaco, metanol, combustibles sintéticos).	Exportaciones se limitan a nichos específicos en mercados con ventajas y acuerdos comerciales.
Reducción de costos del H2V	Economías de escala y avances tecnológicos permiten reducir el costo del H2V por debajo de US\$2/kg antes de 2030.	Reducción de costos más lenta; el precio del H2V se mantiene entre US\$2,5 y US\$4/kg en 2030, limitando su competitividad.
Inversión en infraestructura	Inversión significativa. Desarrollo de electrolizadores a gran escala, redes de transporte y almacenamiento, incluyendo gasoductos y puertos especializados. Generación de hubs estratégicos complejos.	Inversión moderada. Desarrollo progresivo de infraestructura base en hubs estratégicos acotados.
Políticas y regulación	Políticas agresivas con subsidios, incentivos fiscales y normativas que favorecen el H2V y precios altos de otras fuentes, tanto en países avanzados como en desarrollo.	Regulación flexible con incentivos selectivos, pero sin intervención estatal fuerte para desplazar combustibles fósiles, principalmente, en algunos países avanzados.
Financiamiento y apoyo estatal	Fondos masivos públicos y privados, atrayendo inversionistas internacionales y financiamiento verde.	Financiamiento limitado y basado en rentabilidad orgánica de proyectos específicos. Con poco aporte estatal.
Innovación y tecnología	Inversiones relevantes en I+D+i: optimización de electrolizadores, inteligencia artificial para eficiencia energética, almacenamiento avanzado y otros.	Inversiones acotadas en I+D+i para mejoras incrementales en eficiencia sin interrupciones tecnológicas en el corto plazo.

Dimensión	Escenario de Desarrollo Acelerado	Escenario de Desarrollo Moderado
Desarrollo de capital humano	Gran demanda de técnicos, ingenieros y otros profesionales en H2V, energías renovables, digitalización, mercados y negocios. Impulsando formación en universidades, entidades TP y empresas.	Demanda moderada en empleo especializado, con formación adaptada a la demanda específica.
Integración con energías renovables	Desarrollo diversificado de parques solares y eólicos dedicados a la producción de H2V, con almacenamiento energético y sistemas híbridos.	Integración limitada de energías renovables para producción de H2V.
Rol de Chile en el mercado global	Se convierte en un hub de H2V para Asia, Europa y América del Norte, liderando exportaciones y acuerdos comerciales. Incluyendo tecnologías, equipos y servicios.	Exportaciones limitadas a mercados específicos con ventajas comparativas. Principalmente, H2V y algo de equipos y servicios.
Sostenibilidad y desafíos ambientales	Gran desarrollo de proyectos con enfoque en huella de carbono mínima y optimización de recursos naturales, con escalamientos significativos.	Crecimiento moderado con énfasis en minimizar impactos locales sin grandes escalamientos.
Impacto en la industria nacional	Transformación acelerada de industrias como la minería, transporte y generación de energía hacia el uso de H2V.	Uso limitado del H2V en minería y transporte, manteniendo usos de otros combustibles en varios sectores.
Riesgos y desafíos	Alta dependencia de financiamiento externo, posible sobreinversión en infraestructura sin mercado asegurado.	Riesgo de rezago tecnológico y pérdida de competitividad frente a otros países que adopten H2V con mayor rapidez.

Fuente: Elaboración propia de la Comisión asistida en el ordenamiento de las columnas por ChatGpt.

5

Dimensiones relevantes de prospectiva de la industria del hidrógeno verde en Chile

El hidrógeno verde y sus derivados son fundamentales para la transición energética global y de Chile, debido a sus abundantes recursos naturales y condiciones climáticas/geográficas excepcionales, teniendo la oportunidad de convertirse en un actor relevante en esta industria.

En el capítulo anterior se definieron dos escenarios prospectivos, que indican futuros posibles de desarrollo de la industria: un escenario de Desarrollo Acelerado y uno de Desarrollo Moderado junto con un grupo de tensiones de cambio (TC) y un conjunto de dimensiones claves a considerar a nivel internacional.

En este capítulo se desarrollan estas dimensiones claves, adaptadas a la realidad de Chile, para cada uno de los escenarios indicados, considerando que, en el escenario de Desarrollo Acelerado, se resuelven todas las Tensiones de Cambio, lo que requiere una dinámica global y en el escenario de Desarrollo Moderado, se resuelven sólo dos de ellas.

5.1. Línea de base para la prospectiva

La industria del hidrógeno verde en Chile ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años, destacándose como un sector estratégico relevante debido a sus abundantes recursos naturales y a las iniciativas gubernamentales como la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, que fue presentada en el año 2020 y busca posicionar al país como uno de los principales exportadores del mundo para el año 2024, iniciativa que se materializa a través del Plan de Acción de Hidrógeno Verde 2023-2030, que contiene 81 medidas concretas en 18 líneas de acción, que incluyen, entre otras, regulación, financiamiento, desarrollo tecnológico y formación de capital humano.

Actores clave en el desarrollo de la industria

En el desarrollo de la industria de hidrógeno verde en Chile participan diversos actores, los principales se describen a continuación:

Gobierno

El Gobierno, a través del Ministerio de Energía, lidera la estrategia nacional y las políticas energéticas, mientras que organismos como CORFO están desempeñando un papel relevante en el financiamiento de proyectos, desarrollo de programas tecnológicos, programas de formación de capital humano especializado y creación de infraestructura.

La Agencia de Sostenibilidad Energética promueve la eficiencia y el uso de energías renovables, y el Ministerio del Medio Ambiente evalúa los impactos ambientales, en tanto que el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación apoya la investigación y la innovación tecnológica.

Además, los Ministerios de Obras Públicas y Transporte trabajan en la infraestructura necesaria para la distribución y uso del hidrógeno, complementados por los gobiernos regionales responsables de la planificación territorial y la atracción de inversiones.

Sector privado

En el sector privado, las empresas generadoras de energías limpias como por ejemplo Enel, Colbún, AES Andes, Acciona y Mainstream desarrollan proyectos de producción de hidrógeno con energías renovables, mientras que las mineras BHP, Anglo American y Antofagasta Minerals exploran el uso del hidrógeno verde para descarbonizar sus operaciones.

También están presentes productores de hidrógeno como por ejemplo HIF Global, TotalEnergies y Siemens Energy, que instalan plantas de electrólisis.

Academia y centros de investigación

La academia y centros de investigación, incluyendo universidades como la de Universidad de Chile, la Pontificia Universidad Católica, la Universidad de Magallanes y la Universidad Técnica Federico Santa María, junto con centros tecnológicos como el Centro de Energía y Fraunhofer Chile, están incorporando el hidrógeno verde en sus currículos y fomentando la investigación en tecnologías de producción, almacenamiento y uso, para asegurar que las futuras generaciones estén preparadas para liderar la transición energética.

Organismos internacionales y multilaterales

Organismos internacionales y multilaterales, como BID, GIZ y el Banco Mundial, entregan apoyo técnico, financiamiento y transferencia de tecnología.

Sociedad civil y ONG's

La sociedad civil y las ONGs también desempeñan un importante rol, al monitorear los impactos sociales y ambientales y promover la participación ciudadana y el desarrollo sostenible.

Inversionistas y entidades financieras

Los inversionistas y las entidades financieras, tanto nacionales como internacionales, financian proyectos e infraestructura relacionada con el hidrógeno verde.

Principales proyectos

En 2025, Chile se posiciona como un líder en el desarrollo de tecnologías de hidrógeno verde, enfocándose en la producción de amoníaco verde y combustibles sintéticos.

Los principales proyectos incluyen en cada una de estas áreas son:

Amoníaco verde

- **H2 Magallanes.** Con una inversión de US\$16.000 millones, ubicado en San Gregorio, pretende producir 1,9 millones de toneladas/año de amoníaco verde y planea iniciar operaciones en 2030.
- **Proyecto EVA.** Desarrollado por EDF en la Región de Magallanes, con un parque eólico de hasta 1 GW para producir 400.000 toneladas/año de amoníaco verde.

Combustibles sintéticos

- **Haru Oni.** En Punta Arenas, una planta piloto en operación desde 2022 produce e-combustibles a partir de hidrógeno verde y CO₂.
- **Cabo Negro.** Prevista en Punta Arenas para producir e-metanol y e-gasolina, está en evaluación ambiental.
- **Planta ENAP/Ferrostaal/Ineratec.** En la Refinería Aconcagua, se centra en estudios de factibilidad para producir 3.500 toneladas/año de *e-fuels*.

Expectativas de Chile en H2V

El país, gracias a su ubicación estratégica, la abundancia de sus recursos naturales y energéticos y su capacidad de innovar y adoptar tecnologías avanzadas, se posiciona como un líder global en la transición hacia una matriz energética más limpia y sostenible.

El desarrollo de la industria abarca toda la cadena de valor: desde la producción, almacenamiento, transporte y distribución, contribuyendo al crecimiento sostenible, a la creación de empleo y a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Con un enfoque en investigación, desarrollo e innovación (I+D+i), Chile tiene la oportunidad de liderar en producción y aplicación, promoviendo el crecimiento económico, la innovación tecnológica y la creación de una industria de equipos y servicios asociados.

Todo ello ayuda a consolidar un ecosistema energético dinámico y sostenible que beneficia a la economía y a la sociedad, impulsando una transición energética efectiva y de largo plazo.

5.2. Escenario de Desarrollo Acelerado

En este escenario:

- La adopción del hidrógeno verde (H2V) crece rápidamente en sectores industriales y de transporte, impulsada por políticas disruptivas y reducción de costos.
- Se desarrolla una infraestructura completa que incluye plantas de producción, transporte, almacenamiento y estaciones de servicio, asegurando un acceso adecuado al hidrógeno.
- La industria del H2V mejora su competitividad frente a combustibles fósiles, gracias a economías de escala y avances tecnológicos que aumentan su eficiencia y aplicaciones.
- Se establecen modelos de negocio y políticas públicas que facilitan su desarrollo acelerado, apoyados en tecnologías de la industria 4.0 como inteligencia artificial e IoT.

Con las siguientes consideraciones específicas:

- Desarrollo acelerado del mercado interno en aquellos usos en que el H2V tiene ventajas respecto de otros combustibles y productos.
- Demostración de competitividad de Chile respecto de otros países considerando producción - almacenamiento - transporte - distribución y uso del H2V y sus derivados.

Este escenario considera además, las cinco tensiones de cambio (TC) señaladas en el capítulo anterior, lo que requiere una dinámica global.

5.2.1. Dimensión económica

Global

El país se alinea con las tendencias internacionales impulsando el uso de H2V en sectores industriales y de transporte mediante políticas activas, competitividad, desarrollo de nuevos mercados y reducción significativa de costos, combinando exportaciones relevantes con el desarrollo del mercado interno.

Reducción de costos:

Se genera una disminución significativa de los costos, a lo largo de toda la cadena de valor del hidrógeno verde, debido principalmente a economías de escala, desarrollo de tecnologías más eficientes y disminución en el precio de las energías renovables: solar y eólica. A medida que la producción de H2V se incrementa, estas mejoras tecnológicas y económicas hacen que el H2V en Chile sea más competitivo que el producido en otros países.

Inversión masiva

Se realizan importantes inversiones, tanto por empresas y entidades nacionales como internacionales en infraestructura, electrolizadores y en otros equipos necesarios para la producción, almacenamiento, transporte y distribución de H2V. Esta inversión satisface la demanda y posiciona a Chile como un productor competitivo en comparación con otros países.

Consumo y mercados

Demanda global masiva

La demanda de hidrógeno verde (H2V) se incrementa significativamente, impulsada por la creciente necesidad de energía limpia y sostenible en sectores industriales clave y difíciles de descarbonizar y por el incremento en la demanda de amoníaco.

Chile, por su distancia a mercados en Europa y otros, tiene el desafío de lograr costos competitivos incluyendo el transporte, más que otros países.

Expansión de mercados

En Chile, emergen nuevos mercados y aplicaciones para el hidrógeno verde, incluyendo su uso en generación de energía, almacenamiento a largo plazo, combustibles sintéticos y amoníaco verde, impulsando el desarrollo de las exportaciones.

Esta expansión incluye exportaciones hacia mercados clave como Europa, Japón y Corea del Sur. En este contexto, el desarrollo del mercado en Chile se centra en aprovechar aquellos usos del hidrógeno verde en los que presenta ventajas significativas frente a otros combustibles como transporte pesado, minería y producción de amoníaco verde y metanol verde.

Competencia internacional entre empresas participantes de la industria

Aumento de la competencia internacional

La competencia internacional entre empresas de diversos países se intensifica, abarcando todas las fases de inversión y desarrollo, desde inversionistas de capital hasta empresas productivas, comercializadoras y operadoras.

Para destacar internacionalmente, Chile demuestra su competitividad en toda la cadena de valor del hidrógeno, desde la generación de energía renovable hasta el uso final del hidrógeno, centrándose en aquellos usos del H2V donde presenta una clara ventaja sobre otros combustibles.

Impacto de la competencia internacional en la eficiencia

A medida que el mercado del H2V se desarrolla rápidamente, la presión competitiva impulsa a las Empresas nacionales y extranjeras que producen en Chile a adoptar tecnologías adecuadas de manera más ágil y oportuna. Esta competencia no solo fomenta avances tecnológicos en el país, sino que también resulta en una mayor eficiencia dentro de las cadenas de valor del hidrógeno verde, generándose reducciones de costos que favorecen la expansión de los usos del H2V en diversas aplicaciones.

5.2.2. Dimensión de competencia de H2V con combustibles fósiles y otras opciones

Global

La industria del hidrógeno verde alcanza en Chile un nivel de competitividad suficiente en comparación con los combustibles fósiles y otras industrias competidoras generando espacios de mercado en los que prevalece el hidrógeno verde, así como otros segmentos en los que continúan dominando las industrias tradicionales, como los combustibles fósiles.

Desplazamiento acelerado de los combustibles fósiles en algunos ámbitos

El hidrógeno verde reemplaza significativamente a los combustibles fósiles en sectores industriales y de transporte pesado en Chile. El logro de un precio competitivo para el hidrógeno verde, combinado con las políticas gubernamentales dirigidas a la reducción de gases de efecto invernadero (GEI), limita el uso de combustibles fósiles en el país.

Mayor rentabilidad respecto al hidrógeno azul

El hidrógeno verde alcanza una mayor rentabilidad que el gas natural con captura de carbono (hidrógeno azul) a medida que los precios de las energías renovables en Chile continúan disminuyendo y se obtienen avances tecnológicos relevantes.

5.2.3. Dimensión infraestructura integral

Desarrollo de infraestructura integral en la cadena de valor de la industria

La creación de una infraestructura integral a lo largo de su cadena de valor es vital para el desarrollo de la industria en Chile y asegurar su viabilidad económica, social y ambiental, por ello se diseñan, implementan y operan plantas industriales para la producción a gran escala, especialmente en zonas con alto potencial energético como el norte y el sur del país.

Concepción de infraestructura integral con mínimo impacto ambiental y social

Es muy importante que la infraestructura integral a ser construida minimice su impacto ambiental y social, garantizando que los proyectos sean aceptables para las comunidades cercanas y para los mercados de destino.

En el país, el desarrollo de la industria del hidrógeno verde toma impulso y se fomenta la confianza y el apoyo de las comunidades cercanas lo que permite consolidar a Chile como un pionero en prácticas sostenibles en el ámbito energético.

Acceso de diversas empresas productivas, de transporte y otras a la infraestructura integral

Las diferentes empresas productivas y de transporte en Chile tienen acceso a una infraestructura integral lo que permite maximizar la eficiencia y reducir los costos operativos, generando economías de escala que incrementan la competitividad de todos los actores involucrados y minimizan el impacto en el entorno territorial y social al evitar la duplicación de instalaciones y reducir la ocupación del suelo.

5.2.4. Dimensión tecnológica

Inversión en I+D e innovación

La inversión en investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) está fuertemente articulada con la de los países líderes para facilitar el desarrollo de los ámbitos tecnológicos más convenientes. Existe una importante colaboración entre el sector público y privado, lo que permite mejorar la eficiencia de producción, reducir los costos y desarrollar nuevas aplicaciones y usos.

Resultados de las innovaciones tecnológicas

Las innovaciones en electrólisis, junto con avances en infraestructuras de almacenamiento y distribución, permiten que el hidrógeno verde sea mucho más eficiente y competitivo en un futuro cercano. Estas mejoras optimizan la producción, hacen que sea más rentable y facilitan una amplia variedad de aplicaciones en sectores como la industria, el transporte y la generación de energía.

Escalabilidad

Los avances tecnológicos permiten escalar la tecnología en toda la cadena de valor de la industria del hidrógeno verde, haciendo posible la reducción de costos y las economías de escala, facilitando su adopción por diferentes tipos de usuarios. Esto impulsa el crecimiento de la industria en Chile y el rápido desarrollo del mercado interno, especialmente en sectores donde el H2V presenta ventajas sobre otros combustibles.

Articulación de tecnologías con modelo industrial 4.0, modelos de negocios avanzados:

Chile implementa modelos de negocios avanzados y políticas públicas innovadoras que permiten la expansión efectiva de la industria del hidrógeno verde. La integración de tecnologías de la industria 4.0, como IoT, inteligencia artificial y analítica de datos, contribuye a mejorar la eficiencia y reducir los costos en la producción y distribución de hidrógeno.

5.2.5. Dimensión de regulación y políticas activas

Políticas audaces de incentivos:

El gobierno implementa, al igual que otros países, políticas audaces de incentivos tales como subsidios y créditos fiscales que permiten el crecimiento de esta industria, acelerando la demanda, principalmente, en los ámbitos en que Chile tiene ventajas y que, además, se puede escalar a nivel internacional.

Los incentivos se enfocan en reducir los costos de producción y en apoyar la infraestructura necesaria para el hidrógeno verde. Estos se complementan con regulaciones obligatorias de descarbonización y un plan de eliminación gradual de combustibles fósiles, enviando un mensaje claro sobre el compromiso del país hacia la sostenibilidad.

Estándares internacionales

El desarrollo e implementación de estándares internacionales promueven el uso, la comercialización y calidad del hidrógeno. Estos estándares facilitan la creación de sinergias entre países y contribuyen a un marco que garantice la sostenibilidad del hidrógeno en el mercado global. Al adoptar estos estándares, Chile se integra efectivamente en la economía del hidrógeno verde, atrayendo inversiones extranjeras y facilitando el acceso a mercados internacionales.

5.2.6. Ámbito/dimensión de prospectiva de ingeniería originada en Chile y asociada a la industrial del H2V

La ingeniería originada en Chile presenta un potencial significativo, impulsado por la creciente demanda de soluciones innovadoras y sostenibles en el sector energético. Esto genera oportunidades en diversas áreas clave, incluyendo desarrollos tecnológicos, diseños de ingeniería, gestión de proyectos de construcción e implementación, así como también servicios de operación y mantenimiento y se extiende a contextos competitivos internacionales en los que las empresas tecnológicas y de ingeniería de diversos países, principalmente aquellos que ya cuentan con capacidades robustas en ingeniería y que están comprometidos con el desarrollo del H2V, estarán presentes.

Las oportunidades que se presentan para las empresas de ingeniería chilenas incluyen:

Necesidades tecnológicas y de ingeniería regionales y nacionales

A medida que la industria del H2V se expande, surgen necesidades críticas de tecnología y servicios asociados para el desarrollo, operación, mantenimiento y actualización de infraestructura en el ámbito regional y nacional. Las empresas de ingeniería chilenas apalancan estas necesidades y crean espacios de especialización, así como modelos de negocios más adecuados que responden a los requerimientos del mercado.

Internacionalización acelerada

Existen necesidades similares en otros países que también están avanzando hacia la implementación del hidrógeno verde. Las empresas chilenas tienen la oportunidad de internacionalizarse rápidamente, yendo más allá de la mera exportación de servicios.

Uso del H2V en distintas aplicaciones

El uso del hidrógeno verde en distintos ámbitos, como la industria y el transporte, abre la puerta a numerosas necesidades tecnológicas y de ingeniería asociadas que se presentan en diferentes contextos globales. Las empresas de ingeniería chilenas contribuyen al desarrollo global, ofreciendo soluciones adaptadas a las particularidades de cada país, aprovechando su experiencia en la implementación de tecnologías innovadoras.

5.3. Escenario de Desarrollo Moderado

En este escenario:

- La adopción del hidrógeno verde (H2V) se realiza de manera gradual y estratégica, enfocándose en sectores donde sus ventajas son claras, como la industria y el transporte de larga distancia.
- Las inversiones en infraestructura se concentran en regiones estratégicas, específicamente Antofagasta y Magallanes, debido a su abundancia de recursos renovables como agua, sol y viento.
- La inversión está dirigida al desarrollo de electrolizadores, estaciones de carga y redes de distribución, con la esperanza de ampliar la infraestructura si el hidrógeno verde demuestra ser competitivo.
- Se desarrolla una infraestructura completa, incluyendo plantas de producción, transporte, almacenamiento y estaciones de servicio, para asegurar un acceso adecuado al hidrógeno.
- La competitividad de la industria del H2V mejora frente a combustibles fósiles, impulsada por innovaciones tecnológicas que aumentan su eficiencia y variedad de usos.
- La implementación de modelos de negocio adecuados y políticas públicas favorables, junto con tecnologías de la industria 4.0 como IA e IoT, facilitan un crecimiento rápido del sector.

Con las siguientes consideraciones específicas:

- Desarrollo rápido del mercado interno en aquellos usos en que el H2V tiene ventajas respecto de otros combustibles.
- Demostración de competitividad de Chile respecto de otros países considerando producción - almacenamiento - transporte - distribución y uso del H2V.

Se consideran además, dos de las cuatro tensiones de cambio (TC) indicadas en el capítulo anterior: competitividad de costos (TC.1) y atracción de inversiones (TC.2).

5.3.1. Dimensión económica

Global

El país se enfoca en sectores industriales y de transporte en los que existen ventajas competitivas en comparación con otros combustibles. Este desarrollo está impulsado por políticas públicas favorables que, aunque no sean disruptivas, crean un entorno propicio para la inversión.

Reducción de costos

Los costos de producción, almacenamiento, transporte y distribución disminuyen de forma moderada debido principalmente a tecnologías más eficientes, mejoras en los modelos de gestión y reducción de los costos de las energías renovables. Aunque la reducción de costos es moderada, es suficiente para que el negocio sea viable y sustentable.

Inversión selectiva

El país realiza inversiones selectivas y significativas en infraestructura, electrolizadores y otros equipos necesarios para la producción, almacenamiento, transporte y distribución de H2V.

Esta estrategia de inversión se concentra en aquellas áreas con un mayor impacto y retorno y están focalizadas en regiones que tienen mayor potencial de generación de energías renovables.

Consumo y mercados

Demanda global moderada y selectiva

La demanda de hidrógeno verde, amoníaco verde y combustibles sintéticos crece de manera selectiva, impulsada por casos de negocio en los que se evidencian tanto la rentabilidad como la sustentabilidad del hidrógeno verde.

El avance en la utilización del hidrógeno verde en Chile se ve respaldado por algunas políticas públicas y una inversión selectiva en infraestructura que abarca la producción, el transporte, almacenamiento y distribución del hidrógeno.

A medida que se incrementa la producción, se facilita la diversificación de sus aplicaciones en distintos sectores.

Desarrollo de mercados

El mercado de hidrógeno verde (H2V) y de sus derivados crece en forma moderada, impulsado por su rentabilidad sustentable, sin necesidad de políticas públicas disruptivas.

El país exporta H2V hacia mercados con demandas crecientes y desarrolla el mercado interno en aplicaciones en las que muestra claras ventajas y es una alternativa viable frente a los combustibles fósiles, como en el transporte pesado y minería.

Competencia internacional entre empresas participantes de la industria

Aumento moderado de competencia internacional

Comienza a formarse la competencia internacional entre empresas de diversos países, abarcando varias fases de inversión y desarrollo, desde inversionistas de capital hasta empresas productivas y comercializadoras.

En el país, el desarrollo del mercado interno se concentra en aquellos usos del H2V en los que se observan ventajas claras sobre otros combustibles, como en la minería y el transporte pesado y también en otros usos, como amoníaco para producción de fertilizante, aunque este crecimiento será más lento.

Impacto parcial de la competencia internacional

Aunque el mercado del H2V en el país avanza a un ritmo moderado, la presión competitiva continúa incentivando a las empresas nacionales y extranjeras que invierten en Chile a explorar y adoptar tecnologías adecuadas, aunque quizás no de forma tan ágil como en un entorno de crecimiento rápido.

Esta competencia promueve algunos avances tecnológicos en el país lo que facilita una mejora gradual de la eficiencia dentro de las cadenas de valor del hidrógeno verde. A medida que se logran reducciones en los costos, se favorece la expansión de los usos del H2V en diversas aplicaciones, desde la industria hasta la movilidad sostenible.

5.3.2. Dimensión de competencia de H2V con combustibles fósiles y otras opciones

Global

La industria del hidrógeno verde en Chile logra una competitividad suficiente en comparación con los combustibles fósiles y otras industrias competidoras por lo que se producen avances significativos en la adopción del hidrógeno verde, impulsando un crecimiento progresivo en su implementación y aceptación en el mercado nacional.

Desplazamiento parcial y moderado de los combustibles fósiles en algunos ámbitos

El hidrógeno verde reemplaza parcial y moderadamente a los combustibles fósiles en ciertos sectores industriales y de transporte pesado en Chile, donde se evidencian sus ventajas en comparación con otras opciones. La obtención de un precio competitivo para el hidrógeno verde en aplicaciones específicas dentro de los mercados de destino, junto con políticas favorables del gobierno, resulta determinante para la sustitución de combustibles fósiles.

Mayor rentabilidad respecto de hidrógeno azul en el mediano y largo plazo

El hidrógeno verde logra una mayor rentabilidad que el hidrógeno azul en el mediano y largo plazo en Chile. Esto se da a medida que los precios de las energías renovables continúan disminuyendo, junto con otros factores de producción.

5.3.3. Dimensión infraestructura básica

Desarrollo de infraestructura básica en la cadena de valor de la industria del H2V.

El desarrollo de infraestructura básica es fundamental para producir y distribuir hidrógeno verde para los casos de negocio seleccionados, que se caracterizan por su rentabilidad sostenible y riesgo moderado, por ello se desarrollan plantas industriales estratégicas, medios de transporte, redes de tuberías, equipamiento para almacenamiento, estaciones de servicio y otros sistemas.

Concepción de la infraestructura básica con impacto ambiental y social más tolerable que las soluciones existentes

Es fundamental que la infraestructura se planifique de manera que minimice su impacto ambiental y social, asegurando que los proyectos sean aceptables para las comunidades cercanas.

En el país, el avance de la industria está en una fase preliminar y este enfoque ayuda a fomentar la confianza y el apoyo de las comunidades locales y sienta las bases para que el país se posicione gradualmente como un referente en prácticas sostenibles dentro del sector energético.

Acceso de empresas productivas, de transporte y otras a la infraestructura básica

Es fundamental el acceso de empresas productivas, de transporte y otros sectores a la infraestructura básica para el hidrógeno verde en Chile para poder lograr economías de escala, reducir costos y minimizar impactos en el entorno social y territorial. Por ello, se fomenta la construcción de instalaciones compartidas, lo que permite que las empresas colaboren y optimicen sus costos operativos y desarrollen redes de distribución más eficientes, alcanzando precios más competitivos, aumentando la adopción del hidrógeno verde y minimizando los impactos negativos en las comunidades locales y el medio ambiente.

5.3.4. Dimensión tecnológica

Inversión en I+D e innovación

El país aumenta significativamente su inversión en investigación, desarrollo e innovación (I+D+i), la que se enfoca en mejorar las tecnologías para aumentar la eficiencia en la producción y distribución, reducir costos y demostrar los beneficios del hidrógeno verde. Esta inversión prioriza la optimización de procesos existentes, asegurando la competitividad de las tecnologías utilizadas. Aunque en menor medida, también se dirige al desarrollo de nuevas aplicaciones y procesos.

Resultados de las innovaciones tecnológicas

Las innovaciones incrementales y mejoras en electrólisis, desarrollos en fabricación de fertilizantes y en infraestructura de almacenamiento y distribución hacen que el hidrógeno verde sea más eficiente y competitivo en el futuro cercano.

Estas innovaciones, sin embargo, no generan una ventaja decisiva sobre otras fuentes de energía convencionales, por lo que se realizan más esfuerzos de investigación y desarrollo con colaboración entre los sectores público y privado.

Escalabilidad parcial

Los avances tecnológicos en Chile permiten el desarrollo de sistemas de producción de hidrógeno verde a mayor escala. Este aumento en la capacidad de producción ayuda a reducir parcialmente los costos y a mejorar la eficiencia energética en la producción de H2V, contribuyendo a su creciente competitividad en el mercado.

Articulación de tecnologías con modelos industrial 4.0, modelos de negocios avanzados

Chile implementa modelos de negocios adecuados y políticas públicas que facilitan la progresiva expansión de la industria del hidrógeno verde. La integración de tecnologías de la industria 4.0, como IoT, inteligencia artificial y analítica de datos, es relevante para mejorar la eficiencia y reducir costos en la producción y distribución de hidrógeno, aunque el impacto pueda ser gradual.

5.3.5. Dimensión de regulaciones y políticas públicas

Políticas de incentivos

El gobierno implementa políticas públicas de incentivos selectivos que apoyan el desarrollo de esta industria. Estas políticas se centran en favorecer usos del hidrógeno con mayor impacto y riesgos controlados, como en la industria pesada y el transporte de mercancías. Los incentivos incluyen subsidios o créditos fiscales para proyectos específicos, maximizando beneficios sin asumir riesgos excesivos. Estas políticas vienen acompañadas de regulaciones selectivas que promueven la descarbonización en ciertos sectores, estableciendo metas de reducción de emisiones.

Estándares internacionales

Se implementan algunos estándares internacionales básicos que facilitan el desarrollo y el comercio global de esta industria emergente. Estos estándares son importantes para garantizar la calidad y seguridad del hidrógeno y promover la confianza de inversores y empresas. Esto permite a Chile comenzar a integrarse en la economía global del hidrógeno y facilita la transferencia de conocimiento y tecnología entre países.

5.3.6. Ámbito/dimensión de prospectiva de ingeniería originada en Chile y asociada a la industrial del H2V

La ingeniería originada en el país presenta un potencial valioso, aunque no necesariamente masivo, debido a las oportunidades que surgen de una demanda moderada. Esto se manifiesta en áreas críticas como el desarrollo de tecnologías, el diseño de soluciones, gestión de proyectos de construcción e implementación, así como en los servicios de operación y mantenimiento.

Este contexto se sitúa en un marco competitivo internacional en el que Chile se enfrenta a empresas tecnológicas y de ingeniería de diversos países, especialmente aquellos que ya poseen capacidades significativas en ingeniería y que están comprometidos con la transición hacia el H2V.

Aunque el crecimiento es gradual, existen diferentes oportunidades que las empresas de ingeniería chilenas pueden aprovechar:

Necesidades tecnológicas y de ingeniería a nivel regional y nacional

A medida que la industria del H2V se desarrolla, surgen necesidades críticas relacionadas con la tecnología y los servicios necesarios para el desarrollo, operación, mantenimiento y actualización progresiva de infraestructuras. Las empresas chilenas capitalizan estas necesidades, creando espacios de especialización que les permiten configurar modelos de negocio más eficientes y adaptados a la demanda local.

Internacionalización moderada

Las empresas de ingeniería y tecnología originadas en Chile tienen la oportunidad de abordar necesidades similares en otros países. Este proceso de internacionalización, aunque moderado, va más allá de la simple exportación de servicios. Gracias a la proyección de experiencia y las ventajas competitivas creadas en Chile, estas empresas se insertan en nichos en mercados externos, en los que la demanda por soluciones específicas de H2V es relevante.

Uso del H2V en distintas aplicaciones

Existen diversas necesidades tecnológicas y de ingeniería asociadas al uso del hidrógeno verde en ámbitos industriales y de transporte. El enfoque está dirigido a mercados en los que se verifica una simultánea rentabilidad y sostenibilidad, lo que potencia el desarrollo de proyectos en países más adecuados para adoptar estas soluciones.

5.4. Dimensión capital humano

El capital humano es una dimensión muy relevante para el desarrollo y proyección de esta industria y es necesario actualizar conocimientos y competencias en personas que desempeñan diversas funciones y roles en el sector.

Plan de Acción de Hidrógeno Verde (2023-2030) y Capital Humano

El Plan de Acción de Hidrógeno Verde (2023-2030) plantea que, para poder instalar y operar una industria de hidrógeno verde y su cadena de valor, es necesario contar con personas bien calificadas que puedan aplicar el conocimiento pertinente en los diversos eslabones del proceso de producción y con instituciones que las formen.

El Plan anterior identifica 18 líneas de acción y 81 acciones específicas. En el ámbito de la educación especializada, en el Plan de Acción hay principalmente tres líneas de acción, que se describen a continuación:

Línea de Acción 15: Fortalecimiento y Desarrollo del Capital Humano

Se busca desarrollar capacidades, a través de capacitación y educación en todos los niveles, según las necesidades de la industria, de modo de aumentar el número de trabajadores especializados y en general fortalecer la fuerza laboral del sector productivo e industrias asociadas al hidrógeno verde.

En esta línea, las acciones propuestas apuntan al desarrollo de capacidades operativas para técnicos en energía basada en hidrógeno verde; la ejecución de programas de preparación para la competitividad en hidrógeno verde y sus derivados; la implementación de estadías en el extranjero para trabajadores industriales; y la puesta en marcha del programa **Entrenar a los entrenadores**.

Línea de Acción 16: Perspectiva de género en la industria

Esta línea tiene por objetivo aprovechar las oportunidades que surgen a propósito del desarrollo de una industria nueva, para avanzar en igualdad de género e inclusión de mujeres, para lo cual se hace necesario enfrentar barreras estructurales y brechas de capacidades. En esta línea, CORFO ofrece el curso “Hidrógeno Verde: Oportunidades & Aplicaciones” (*on-line*), con foco en mujeres —impartido exclusivamente por profesoras mujeres destacadas de distintas áreas técnicas, tanto de instituciones públicas como de empresas privadas— que busca contribuir en el desarrollo profesional de mujeres de tal forma de aumentar el capital humano calificado y especializado a lo largo de la cadena de valor del H2V.

Línea de Acción 17: Impulso de investigación, Desarrollo e innovación

Busca promover una coordinación armónica entre instituciones de investigación e innovación, por un lado, y el sector público, por otro, convencidos de que la investigación e innovación en hidrógeno verde y su cadena de valor ofrecen la oportunidad de contribuir a objetivos de desarrollo nacionales de amplio alcance.

Aquí, las acciones están dirigidas a analizar los desafíos de I&D, a desarrollar concursos de I&D&I, impulsar el desarrollo tecnológico especializado mediante Centros, y a generar y diseminar información pertinente.

Perfiles y requerimientos de Capital Humano

En cada escenario se requieren perfiles y requerimientos de capital humano que presentan diferencias entre sus principales funciones y objetivos.

En el **Cuadro 5.1** se muestran las similitudes y diferencias entre los perfiles y requerimientos en ambos escenarios, en áreas claves como: inversión, política pública, ingeniería, tecnología e innovación, junto con los requerimientos estructurales para fortalecer el sector del hidrógeno verde en Chile.

Cuadro 5.1

Perfil	Escenario Desarrollo Acelerado	Escenario Desarrollo Moderado
Desarrolladores e implementadores de inversiones	Creación y ejecución de proyectos rentables y sostenibles en diversas cadenas de valor.	Generación de inversiones rentables y sostenibles en áreas clave de la cadena de valor.
	Maximización del retorno económico y de efectos ambientales y sociales positivos.	Maximización del retorno económico y de efectos ambientales y sociales positivos.
Desarrolladores e implementadores de políticas públicas	Formulación de marcos regulatorios alineados con interés del gobierno, empresas y comunidades.	Formulación de políticas que establezcan un marco regulatorio incentivador de inversiones,
	Promoción del desarrollo y crecimiento del sector.	Promoción del uso seguro y eficiente del hidrógeno verde.
Ingenieros y técnicos	Capacitación en diversas áreas: ingeniería, construcción, operación y mantenimiento de infraestructura.	Profesionales especializados en fases de la industria desde ingeniería hasta operación y mantenimiento.
	Trabajo en plantas productivas, sistemas de almacenamiento y redes de distribución.	Trabajo en infraestructura, plantas y redes de almacenamiento y distribución.

Perfil	Escenario Desarrollo Acelerado	Escenario Desarrollo Moderado
Especialistas en tecnologías de la industria 4.0	Conocimientos en analítica avanzada, IA, simuladores, IoT, automatización y tecnologías digitales.	Profesionales en tecnologías relevantes: analítica avanzada, IA, simuladores, IoT, automatización.
	Optimización de procesos y sistemas para aumentar eficiencia y competitividad.	Optimización de procesos para mejorar la competitividad.
Investigadores y desarrolladores tecnológicos	Abordaje de necesidades de I+D+i en hidrógeno verde para mantener a Chile a la vanguardia tecnológica.	Investigadores que respondan a necesidades de I+D+i y mejoren tecnologías existentes,
		Desarrollo de nuevas soluciones para implementación eficaz de la industria.
Emprendedores innovadores	Desarrollo de dispositivos y sistemas para mejorar competitividad sostenible.	Desarrollo de dispositivos y sistemas para aumentar competitividad en nichos de mayor valor.
	Posibilidad de configurar nuevas industrias dentro del ecosistema.	Potencial creación de nuevas industrias futuras.
Requerimientos	Hubs de atracción y retención de capital humano.	Establecimiento de hubs parciales para atracción y retención de capital humano.
	Desarrollo continuo de competencias para profesionales y técnicos (<i>upskilling</i>).	Desarrollo de competencias (<i>upskilling</i>).
	Renovación y ampliación de formación en IES.	Renovación y ampliación en formación en IES.
	Chile como actor relevante internacional en hidrógeno verde.	Proyección internacional de Chile como actor emergente en el sector.

Fuente: Elaboración propia de la comisión.

5.5. Resumen Escenarios

5.5.1. Resumen Escenario de Desarrollo Acelerado

Aspecto	Detalle
Crecimiento del mercado	Expansión acelerada en sectores industriales y de transporte, impulsada por políticas disruptivas y reducción de costos.
Infraestructura	Desarrollo de plantas de producción, transporte, almacenamiento y estaciones de servicio, asegurando acceso total.
Competitividad	Mejora en la competitividad frente a combustibles fósiles mediante economías de escala y avances tecnológicos.
Modelo de negocio y tecnologías	Implementación de modelos innovadores y uso intensivo de Industria 4.0 (IA, IoT) para facilitar el crecimiento.
Demanda	Mercado interno y externo en expansión, incluyendo exportaciones a Europa, Japón y Corea del Sur en varias aplicaciones.
Reducción de costos	Disminución significativa por economías de escala, energías renovables y avances tecnológicos.
Inversión	Inversiones masivas nacionales e internacionales para infraestructura, producción y distribución.
Uso y mercados	Crecimiento en generación energética, almacenamiento, combustibles sintéticos y amoníaco verde; exportaciones en desarrollo.
Competencia internacional	Aumenta la competencia en toda la cadena de valor, elevando eficiencia y tecnología en Chile y globalmente.
Desplazamiento de combustibles fósiles	Reemplazo acelerado de combustibles fósiles en sectores industriales y transporte pesado, con tarifas competitivas.
Rentabilidad	Mayor rentabilidad del H2V frente al hidrógeno azul, gracias a menores costos y mayores avances tecnológicos.
Infraestructura integral	Creación de infraestructura moderna y sustentable, con acceso abierto para empresas y minimización del impacto ambiental y social.
Innovación y I+D	Fuerte inversión en I+D, promoviendo innovación tecnológica y adaptación para diferentes aplicaciones.
Políticas públicas	Incentivos audaces, subsidios, estándares internacionales y marco regulatorio que fomentan el crecimiento y la internacionalización.
Oportunidades de ingeniería	Potencial para la ingeniería chilena en desarrollo de tecnologías, servicios y expansión internacional.

Fuente: Elaboración propia de la comisión.

5.5.2. Resumen Escenario Desarrollo Moderado

Aspecto	Detalle
Crecimiento del mercado	Crecimiento gradual y selectivo, enfocado en sectores con ventajas claras como minería y transporte de larga distancia, con expansión progresiva en aplicaciones y mercados.
Infraestructura	Inversiones en regiones estratégicas, principalmente Antofagasta y Magallanes, desarrollando plantas, estaciones y redes de distribución, con posibilidad de ampliar en función de la competitividad del H2V.
Competitividad	Mejora en eficiencia y usos del hidrógeno, impulsada por innovaciones tecnológicas y modelos de negocio adecuados que favorecen su adopción en sectores clave.
Modelo de negocio y tecnologías	Uso de modelos de negocio adaptados, integrando tecnologías como IA e IoT en procesos de producción y distribución, con crecimiento moderado en escalabilidad y eficiencia.
Demanda	Incremento moderado y selectivo en el mercado interno y en exportaciones, orientado a usos donde el H2V es rentable y sustentable, como minería y transporte pesado.
Reducción de costos	Disminución moderada en costos de producción, almacenamiento y transporte, gracias a tecnologías más eficientes y menores precios de energías renovables, asegurando sostenibilidad del negocio.
Inversión	Inversiones selectivas en infraestructura, enfocadas en regiones con alto potencial renovable, con estrategias que priorizan impactos y retornos relevantes.
Uso y mercados	Mercado en crecimiento moderado en aplicaciones industriales, energéticas y transporte, con exportaciones en desarrollo y adopción en sectores donde el H2V tiene ventajas competitivas.
Competencia internacional	Aumento moderado de competencia, que incentiva a empresas chilenas y extranjeras a incorporar tecnologías y reducir costos gradualmente, logrando rendimiento sostenible en la industria.
Desplazamiento de combustibles fósiles	Reemplazo parcial y moderado en sectores como minería y transporte pesado, con precios competitivos que incentivan su adopción donde el H2V presenta ventajas.
Rentabilidad	El H2V alcanza mayor rentabilidad en el mediano plazo respecto al hidrógeno azul, debido a la reducción de costos y avances tecnológicos que mejoran su competencia.
Infraestructura integral	Desarrollo de infraestructura modular y eficiente para producción, transporte y almacenamiento, con impacto ambiental y social moderado, promoviendo confianza social.

Aspecto	Detalle
Innovación y I+D	Incremento en inversión en innovación tecnológica para mejorar eficiencia, reducir costos y ampliar aplicaciones, en colaboración público-privada, con avances incrementales en electrólisis y almacenamiento.
Políticas públicas	Políticas favorables y selectivas, que fomentan usos específicos en industrias tradicionales y transportes, apoyadas por incentivos y regulaciones para reducir emisiones.
Oportunidades de ingeniería	Potencial en desarrollo tecnológico y servicios de ingeniería, con oportunidades de negocio en diseño, operación y mantenimiento, tanto a nivel nacional como internacional en mercados semejantes.

Fuente: Elaboración propia de la comisión.

6

Conclusiones

El futuro de la industria del Hidrógeno Verde en Chile —y a escala internacional— depende de decisiones estratégicas. El país tiene condiciones favorables: dotación de energías renovables (solar, eólica), una política pública de H2V y proyectos en curso de escala mundial.

Chile puede optar con determinación para convertirse en un productor competitivo e innovador, capaz de integrar una economía basada en conocimiento, sostenibilidad y energía limpia.

Este informe de prospectiva hacia 2035 es un instrumento para apoyar esa decisión con la **construcción de escenarios futuros posibles y valiosos**.

Escenarios de futuro: entre lo global y lo nacional

La industria del Hidrógeno Verde (iH2V) se perfila como uno de los pilares de la transición energética global, con un potencial transformador de la producción industrial, el transporte, la generación eléctrica y los patrones de comercio internacional de energía.

Su despliegue se proyecta diferenciadamente en los territorios: dependiendo de decisiones estratégicas, capacidades tecnológicas, políticas de mediano y largo plazo e infraestructuras habilitantes.

Escala internacional

A nivel global, la CPI IING visualiza dos trayectorias:

- **Escenario de Desarrollo Acelerado.** Caracterizado por significativa inversión pública y privada, marcos regulatorios claros y proactivos, avances tecnológicos rápidos (electrólisis directa con agua de mar, nuevos materiales, reducción de costos a gran escala) y convergencia entre políticas climáticas, de desarrollo productivo sostenible y de seguridad energética.
En este escenario, el H2V se vuelve un producto clave hacia 2035, desplazando progresivamente a combustibles fósiles en sectores como siderurgia, transporte, producción de fertilizantes y otros.
- **Escenario de Desarrollo Moderado.** El crecimiento es desigual, concentrado en ciertos polos (Estados Unidos, Europa, China, Australia, otros), donde existen condiciones excepcionales de recursos, demanda interna y capacidades tecnológicas. En otros países, el avance se ve demorado por barreras institucionales, insuficiente demanda local, competencia con el hidrógeno azul y otros factores.

Escala chilena

Chile se enfrenta a un punto de inflexión, con escenarios diferenciados:

- **Escenario de Desarrollo Acelerado.** Chile logra consolidarse como actor clave en el mercado internacional, gracias a políticas públicas proactivas en los mercados de destino y en el país, coordinación territorial, inversión en I+D+i, fortalecimiento de capacidades tecnológicas nacionales (manufactura de componentes, ingeniería local, servicios avanzados), vinculación efectiva con mercados asiáticos y europeos, y exportación temprana.
Se desarrollan polos de producción en Magallanes, Antofagasta, Biobío y otros lugares con aplicaciones en minería, agricultura, transporte y producción verde.
La industria del H2V se convierte en una importante base productiva y exportadora del país.
- **Escenario de Desarrollo Moderado.** Chile avanza gradualmente con poca expansión de los mercados internacionales, regulaciones cautas, infraestructura parcial y articulación territorial orgánica.
Se realizan proyectos piloto y a escala industrial que son rentables sin asumir riesgos relevantes. Las tecnologías evolucionan parcialmente, con pocas innovaciones, con demanda externa variable y algunas barreras institucionales.

Valor de la prospectiva a 10 años

La **prospectiva a 10 años** permite visualizar rutas de transformación posibles para la industria del H2V a partir del estado actual. Esto permite:

- **Anticipación de disyuntivas estratégicas.** En vez de proyecciones aspiracionales de mercados y tecnologías, el enfoque prospectivo usado permite **identificar ámbitos de alternativas**: decisiones críticas que, al tomarse o no, condicionan los posibles futuros de la industria H2V. En particular, esto se representa en las 5 tensiones de cambio señaladas en el capítulo 4.
- **Visión integrada de dimensiones clave.** La prospectiva no se limita a analizar situaciones o proyectos existentes. Integra múltiples dimensiones: tecnológica, económica, regulatoria, ambiental, social y territorial. Esto permite proyectar **trayectorias evolutivas estructurales** de la industria que superan los análisis centrados solo en oferta-demanda e inversión extranjera.
- **Herramienta de alineamiento institucional.** Este informe ofrece un insumo valioso para alinear a los distintos actores del ecosistema (Estado, empresas, emprendedores, Instituciones de Educación Superior, comunidades). Plantea escenarios compartidos entre actores, creación de valor, metas alcanzables y riesgos críticos, favoreciendo la coordinación de políticas e inversiones de mediano y largo plazo.
- **Base para planificación territorial e industrial.** Esta prospectiva contribuye a imaginar y diseñar **ecosistemas industriales y territoriales sostenibles** alrededor del H2V, incluyendo cadenas de valor locales e internacionales, formación de capital humano y reconversión laboral, desarrollo de clústeres regionales articulados nacional e internacionalmente, y distribución equitativa de beneficios.
- **Mitigación de incertidumbre estructural.** En un entorno internacional caracterizado por incertidumbre económica, tecnológica, geopolítica y climática, esta prospectiva entrega **herramientas para decidir con visión de futuro**, minimizando posibles carencias de inversión, de políticas públicas, de desarrollo tecnológico o desaprovechamiento de oportunidades para el desarrollo del país.

Factores relevantes de la prospectiva de iH2V en Chile

La industria del Hidrógeno Verde (iH2V) se posiciona como un pilar estratégico en la transición energética global, impulsada por acuerdos internacionales de descarbonización, avances tecnológicos en electrólisis y otros procesos (productivos, transporte, distribución, uso), y políticas públicas favorables.

Impulsores clave

- **Tecnología.** Reducción de costos en electrolizadores, innovación en uso de agua de mar o residual para producción de agua de procesos para H2V y avances en almacenamiento y transporte.
- **Políticas de Estado.** Estrategia Nacional de H2V (2020) y Plan de Acción (2023-2030) con diferentes líneas de acción.
- **Mercado y economía.** Aumento de la demanda y competencia internacional (hidrógeno y amoníaco verde, metanol y otros combustibles).

Desafíos y brechas

- Necesidad de infraestructura compartida y legislación sectorial específica.
- Insuficiente demanda interna y necesidad de incentivos para su adopción.
- Costos iniciales altos y subsidios a combustibles fósiles aún vigentes que distorsionan la competencia entre tipos de energía.
- Necesidad de mayor formación de capital humano técnico y profesional.

Oportunidades para Chile

- Alta competitividad en costos de producción gracias a energías renovables.
- Posicionamiento geopolítico como proveedor confiable hacia Europa y Asia.
- Aplicaciones en transporte de larga distancia, minería, agricultura (fertilizantes verdes) e industria del acero y hierro (minerales verdes).
- Exportación de conocimientos, tecnologías e ingeniería asociadas a iH2V.

Conclusión general

Este informe reafirma que Chile posee una ventana estratégica para transformarse en un líder global en la producción y exportación de hidrógeno verde, sustentado por ventajas naturales, políticas públicas ya en marcha, atracción de inversión extranjera y un creciente ecosistema de innovación y colaboración internacional.

Sin embargo, este liderazgo no está garantizado, y requiere decisiones significativas y coordinadas.

Conclusiones específicas

- **Ventajas comparativas no aseguran ventajas competitivas.** La disponibilidad de recursos renovables debe traducirse en inversiones efectivas, infraestructura habilitante y un entorno regulatorio claro, moderno y estable con bajos costos de suministro eléctrico.
- **El acceso al mercado internacional requiere asegurar costos competitivos en las cadenas de valor hasta los lugares de uso del H2V.** Chile permite costos competitivos en la producción, pero es necesario compensar los costos de transporte y distribución hasta los mercados de destino en diversos países.
- **El desarrollo del mercado interno es clave para sostener la industria.** Aunque la exportación es fundamental, la creación de demanda nacional robusta (transporte, fertilizantes, minería, siderurgia) puede dinamizar la producción local y facilitar economías de escala.
- **La formación de capital humano y capacidades tecnológicas locales es esencial.** El éxito depende en gran medida de la existencia de profesionales y técnicos especializados, así como de centros de innovación articulados con la industria y con articulación internacional.
- **La competitividad depende de innovación constante.** Chile debe impulsar su propia capacidad de I+D+i, no solo adoptar tecnologías extranjeras. La manufactura de componentes críticos, como electrolizadores y otros equipos, y la ingeniería asociada, son claves para generar y capturar valor.
- **La articulación público-privada debe fortalecerse.** Las políticas públicas deben ser tan proactivas como sea posible, orientadas por objetivos comunes, y deben contar con mecanismos de implementación territorial que aseguren creación de valor relevante para diversos actores. Entidades públicas como CORFO y algunas empresas han avanzado, pero se requiere progresar a escalas y alcances mayores.
- **Es determinante resolver brechas en infraestructura e incentivos.** Esto es necesario para aprovechar las oportunidades del país, en particular frente a competidores internacionales. Considerando habilitantes claves como redes, almacenamiento, puertos, hidrolineras, mecanismos de certificación y otros.
- **El hidrógeno verde puede ser un nuevo motor de desarrollo territorial.** Proyectos distribuidos, usos agrícolas, encadenamientos industriales y otros ámbitos permiten visualizar un modelo de desarrollo descentralizado y más inclusivo, si se organizan adecuadamente.
- **Chile debe asegurar y proyectar su credibilidad internacional.** La consolidación de acuerdos de exportación y alianzas estratégicas con Europa, Asia y América del Norte requiere certidumbre jurídica, ambiental y comercial, así como cumplimiento riguroso de estándares.

INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

Empresas Socias

ALSTOM CHILE S.A.

ANGLO AMERICAN CHILE LTDA.

ANTOFAGASTA MINERALS S.A.

ASOCIACIÓN DE CANALISTAS SOCIEDAD DEL CANAL DE MAIPO

BESALCO S.A.

CÍA. DE PETRÓLEOS DE CHILE COPEC S.A.

COLBÚN S.A.

CyD INGENIERÍA LTDA.

EMPRESA CONSTRUCTORA BELFI S.A.

GUZMÁN Y LARRAÍN VIVIENDAS ECONÓMICAS SpA

EMPRESA CONSTRUCTORA PRECON S.A.

EMPRESA NACIONAL DE TELECOMUNICACIONES S.A.

EMPRESAS CMPC S.A.

ENAEX S.A.

INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN SIGDO KOPPERS S.A.

SOCIEDAD QUÍMICA Y MINERA DE CHILE S.A.

EMPRESAS DE INGENIERÍA COLABORADORAS

ACTIC CONSULTORES LTDA.

ARCADIS CHILE S.A.

IEC INGENIERÍA S.A.

JRI INGENIERÍA S.A.

LEN Y ASOCIADOS INGENIEROS CONSULTORES LTDA.

SYNEX CONSULTORES LTDA.



INSTITUTO DE INGENIEROS
CHILE



Nuestros canales digitales:

Sitio web: www.iing.cl

Linkedin: <https://www.linkedin.com/company/64274333/admin/>

E-mail: iing@iing.cl · secretaria@institutodeingenierosdechile.cl

Nuestros teléfonos:

(+56) 22696 8647 · (+56) 93736 0656