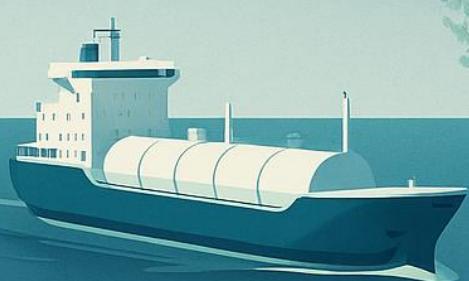




Universidad
de Valparaíso
CHILE



Diagnóstico de Factibilidad para la
Implementación de Corredor de Hidrógeno Verde
y sus Derivados en la Industria Marítima Portuaria
de la Región de Valparaíso (Zona Quintero)



Este documento se generó como resultado del proyecto de vinculación con el medio: “**Diagnóstico de factibilidad para la implementación de corredor de hidrógeno verde y sus derivados en la industria marítima portuaria de la región de Valparaíso (zona Quinteto)**”, financiado a través del proyecto de la Universidad de Valparaíso “Creando lazos permanentes con la comunidad regional: por una vinculación con el medio más significativa y bidireccional”, financiado con Fondos del proyecto de Educación Superior Regional, código “UVA2295”.

Autores principales

- Daniella De Luca Navarrete. Centro de Desarrollo Económico Internacional, Escuela de Negocios Internacionales, Universidad de Valparaíso.
- Felipe Caselli Benavente. Escuela de Ingeniería Oceánica, Universidad de Valparaíso.
- Teresa Pino Vera. Centro de Desarrollo Económico Internacional, Escuela de Negocios Internacionales, Universidad de Valparaíso.
- Pamela Godoy Carrasco. Magíster en Administración y Gestión Portuaria, Escuela de Ingeniería Oceánica, Universidad de Valparaíso.

Socios estratégicos

- T1 Rodolfo Martínez Benavente, Dirección de Programas, Investigación y Desarrollo de la Armada de Chile.
- Marco Vaccarezza. Fraunhofer Chile Research.

Colaboradores

- 4 estudiante de pregrado de la carrera de Ingeniería en Negocios Internacionales, Escuela de Negocios Internacionales, Universidad de Valparaíso

Agradecimientos

Se agradece especialmente a quienes participaron del proceso de entrevistas y del taller realizados para el desarrollo de este estudio:

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none">• Ricardo Tejada. ANA• CN LT Gonzalo Araya Gajardo. Armada de Chile• CF LT Jonathan Dimter. Armada de Chile• Guacolda Vargas. Empresa Portuaria Talcahuano - San Vicente• Nicolás Correa. ENAP• Juris Agüero Carocca. ENAP | <ul style="list-style-type: none">• Pablo Tello Guerra. GIZ• Sebastián Curinao. GNL Quintero• Matías García. Ministerio de Energía• Claudia Rodríguez. Ministerio de Energía• David Medrano. Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones• Eduardo Monsalve. Puerto Ventana |
|---|--|

Del mismo modo agradecer a quienes participaron en el workshop “Diagnóstico de Factibilidad del Desarrollo de una Plataforma y corredor de h2v y sus derivados”, cuyos aportes fueron muy significativos para la construcción de las brechas detectadas:

- Adelaida Baeriswyl. Ministerio de Energía.
- Alex Ríos. EFE.
- Carolina Osores. Universidad de Valparaíso.
- Claudio Benítez. Empresa Portuaria de Valparaíso.
- Claudio Morales. ASONAVE.
- Constantino Villarroel. Universidad de Valparaíso
- Eduardo Montero. Empresa Portuaria San Antonio.
- Emilio Soza. Humboldt.
- Esteban Sefair. Universidad de Valparaíso.
- Etienne Choupay. CORFO.
- Felipe Berrios. Empresa Portuaria San Antonio.
- Gilka Da Silva. Empresa Portuaria Valparaíso.
- Gustavo Gavilánez. CORFO.
- Jorge Budrovich. Universidad de Valparaíso.
- Julio Toro. Empresa Portuaria San Antonio.
- Marcelo Baeza. Universidad de Valparaíso.
- Marco Vaccarezza. Fundación Fraunhofer Chile.
- Matías Fernández. Universidad de Valparaíso.
- Matías García. Ministerio de Energía.
- Pablo Vargas. MARVAL.
- Ramón Vásquez. Armada de Chile.
- Raquel Meza. Fundación Mascarona.
- Renato Araya. EFE.
- Ricardo Tejada. Asociación nacional de Armadores.
- Rosa Tamayo. Tech Global.
- Susan Hayvand. Humboldt.
- Víctor Pérez. Ministerio de transporte.

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	4
2.	JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO	6
2.1	Situación actual del Hidrógeno verde en Chile	6
2.2	Potencial actual de puertos chilenos para participar en mercado de Hidrógeno	7
2.4.	Infraestructura portuaria de Quintero en el contexto nacional.....	9
2.3	Objetivos del estudio.....	10
3.	METODOLOGÍA	11
4.	CADENA DE VALOR DEL HIDRÓGENO VERDE.....	13
4.1	Producción y Desarrollo portuario de Hidrógeno Verde (H ₂ V)	13
4.2	Derivados del Hidrógeno Verde (H ₂ V).....	14
4.2.1.	Consideraciones sobre vectores energéticos y riesgos asociados.....	14
4.2.2.	¿Qué son los corredores Verdes?.....	15
4.3	Logística del Hidrógeno: Almacenamiento, Adecuación y Transporte	17
4.3.1.	Almacenamiento y adecuación.....	17
4.3.2.	Transporte	18
4.3.3.	Factores que impactan el costo del transporte del hidrógeno y derivados	20
5.	HIDRÓGENO EN EL TRANSPORTE MARÍTIMO	21
5.1.	Situación Actual de las Rutas Marítimas para el Transporte de Hidrógeno y sus Derivados como Carga.....	25
5.2.	Demandas.....	26
6.	NORMATIVA Y REGULACIÓN	28
6.1.	Regulación y estándares portuarios para transferencia de hidrógeno	28
6.2.	Regulación y estándares portuarios para combustible	30
6.2.1.	Amoníaco.....	30
6.2.2.	Metanol	30
6.3.	Infraestructura requerida en los puertos para la transferencia de h ₂	30
6.3.1.	Caso de Éxito Internacional a Replicar: La Inversión de CMB.TECH en Namibia para el Desarrollo de Hidrógeno Verde	31
6.3.2.	Aplicación del Modelo en Chile y Estrategias para Atraer Inversiones	32
6.3.3.	Consideraciones sobre vectores energéticos y riesgos asociados.....	33
6.3.4.	Adecuación de tipos de flota y requerimientos portuarios.....	33
7.	BRECHAS DETECTADAS	35
7.1.	Infraestructura Portuaria y Articulación Logística	35
7.2.	Brechas Normativas y Políticas Públicas	35

7.3. Colaboración Interinstitucional y Aceptación Social	36
7.4. Financiamiento y Modelos de Negocio Sostenibles	36
7.5. Innovación, Capital Humano y Observatorio Tecnológico.....	36
7.6. Recomendaciones Estratégicas	37
8. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	38
9. REFERENCIAS	40
10. ANEXOS.....	43
Regulación amoníaco	43
Regulación metanol	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Carga en sector Quintero	9
Figura 2 - Infraestructura para la importación y exportación de H2V y sus derivados	10
Figura 3 - Costos de transporte de hidrógeno y derivados para distintas distancias	21
Figura 4 - Buque Suiso- Frontier	24
Figura 5 - Rutas de Transporte y Perspectivas de Exportación de Hidrógeno Verde en Chile.....	27
Figura 6 - CMB.TECH en Namibia	33

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Infraestructura portuaria en sector Quintero	10
Tabla 2 - Proyectos de hidrógeno verde por país	25
Tabla 3 - Regulaciones y estándares del Hidrógeno y sus derivados	28
Tabla 4 - Normativa aplicable en Chile para el amoníaco	43
Tabla 5 - Regulación Metanol	44

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático representa uno de los desafíos más urgentes a nivel global, impulsando una transición acelerada hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles. En este contexto, el hidrógeno verde (H_2V) ha emergido como un vector energético clave para Chile, debido a su capacidad para almacenar, transportar energía de forma eficiente (International Climate Initiative, 2022), y a su producción libre de emisiones mediante electrólisis del agua utilizando únicamente electricidad proveniente de fuentes renovables, como la solar fotovoltaica, la eólica, la hidroeléctrica sostenible y, en menor medida, la geotérmica, mareomotriz y undimotriz.

Este proceso permite obtener hidrógeno sin generar emisiones de carbono, posicionando al H_2V como una alternativa estratégica para la descarbonización de sectores altamente emisores, tales como la industria pesada y el transporte. Chile, por su parte, posee ventajas competitivas significativas para liderar esta industria, gracias a su abundante potencial en energías renovables —con alta radiación solar en el norte y fuertes vientos en el sur—, su extensa costa con acceso a agua de mar y una infraestructura portuaria desarrollada. Estas condiciones facilitan tanto la distribución interna como el comercio internacional de hidrógeno y sus derivados, como el amoníaco, el metanol y otros biocombustibles, elementos esenciales en la transición hacia economías bajas en carbono.

A pesar de los avances alcanzados, subsisten desafíos importantes, especialmente en sectores intensivos en energía como el transporte marítimo. Este sector, crucial para el comercio internacional —responsable de más del 80% del volumen del comercio global y cerca del 3% de las emisiones de gases de efecto invernadero (UNCTAD, 2023)— enfrenta crecientes exigencias para reducir su impacto ambiental. Si bien el comercio internacional de hidrógeno aún se encuentra en una etapa incipiente, se proyecta que para 2030 más del 20% de la demanda global será cubierta a través de intercambios internacionales. Actualmente, el amoníaco y el metanol son los principales derivados comercializados: en 2021, aproximadamente el 10% y 20% de su demanda mundial, respectivamente, fue cubierta mediante comercio exterior, aunque en su mayoría con fines químicos y no energéticos (IEA, 2023).

En este escenario, la infraestructura portuaria existente en Chile ofrece una oportunidad concreta para el desarrollo del transporte interno y para posicionar al país como un actor relevante en el comercio internacional de estos nuevos vectores energéticos. La región de Valparaíso —y en particular en el puerto de Quintero— se perfila como un polo estratégico para el desarrollo de la distribución y almacenamiento del hidrógeno verde. Su consolidada red de terminales marítimos, la cercanía a los principales centros de consumos industriales del país, y la infraestructura energética instalada —como las instalaciones destinadas al gas natural licuado (GNL)— permiten visualizar a Quintero como un nodo logístico clave para la recepción, almacenamiento y posible redistribución de hidrógeno verde producido en otras regiones. Estas condiciones proyectan a Quintero como un punto de transferencia clave mediante cabotaje, fortaleciendo la cadena de suministro nacional y contribuyendo a los objetivos de descarbonización del país. Al mismo tiempo, lo posicionan como un nodo estratégico en el diseño de rutas marítimas (Corredores) para naves impulsadas por energías limpias, apoyando así los compromisos de descarbonización promovidos por la Organización Marítima Internacional (OMI).

Este informe presenta los principales resultados del proyecto de vinculación con el medio desarrollado por la Universidad de Valparaíso, cuyo objetivo fue identificar los factores técnicos, logísticos y de infraestructura necesarios para habilitar un corredor de hidrógeno verde en la zona de Quintero. La iniciativa busca fortalecer las capacidades regionales para el almacenamiento y

transporte de H₂V y sus derivados, posicionando a la región como un nodo estratégico dentro de la red de distribución nacional e internacional de estos vectores energéticos. Con ello, se apunta a fomentar el desarrollo regional y a mejorar la competitividad de Chile en los mercados globales de energía sostenible.

Si bien el proyecto “Hidrógeno Verde Bahía Quintero” posiciona a este puerto como un actor relevante para atender la demanda local, desde una perspectiva exportadora —considerando que las mejores condiciones de producción se concentran en otras zonas del país—, Quintero se perfila principalmente como infraestructura de tránsito. Es decir, como un posible puerto de cabotaje dentro de una red marítima nacional que conecta centros de producción con terminales de exportación.

El estudio fue desarrollado por investigadores de las Escuelas de Negocios Internacionales e Ingeniería Oceánica de la Universidad de Valparaíso, con la participación de estudiantes de pre y postgrado. Contó, además, con la colaboración de la Armada de Chile —en su rol de autoridad marítima y en el marco de los compromisos del país ante la Organización Marítima Internacional (OMI)— y de la Fundación Fraunhofer, líder mundial en innovación y tecnologías avanzadas dedicada a la creación de soluciones para la descarbonización de la industria, con el respaldo de la red Fraunhofer-Gesellschaft, Alemania. También participaron actores de la academia, del sector portuario y del ámbito privado, con quienes se analizaron los principales ámbitos en los que Quintero debe avanzar para consolidarse como un puerto logístico orientado al hidrógeno verde. El estudio identificó brechas e indefiniciones normativas y de mercado que limitan el desarrollo del sector, ya que la implementación de una plataforma de almacenamiento y un corredor marítimo para H₂V y sus derivados en la zona requiere superar desafíos logísticos, regulatorios y tecnológicos que actualmente condicionan su viabilidad.

2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO

La urgencia por descarbonizar la economía global se ha transformado en una prioridad para gobiernos, empresas y la ciudadanía; en consecuencia, se han definido metas ambiciosas para disminuir las emisiones del transporte marítimo internacional, lo que exige acciones coordinadas y colaboración entre diversos actores. En este contexto, el hidrógeno verde, y sus derivados, se posiciona como una alternativa viable y estratégica para apoyar esta transición energética.

Chile cuenta con condiciones naturales excepcionales —abundante radiación solar en el norte y fuertes vientos en el sur— que le otorgan un enorme potencial para la producción de hidrógeno verde. Este recurso, junto con la Estrategia Nacional de Hidrógeno definida y el impulso de iniciativas tanto públicas como privadas, posiciona al país como un futuro exportador de energía limpia. Este desarrollo no solo podría transformar la matriz energética nacional, sino también consolidar a Chile como un actor relevante en los mercados energéticos globales. Sin embargo, aún existen muchas preguntas sobre cómo los puertos nacionales, especialmente aquellos en la Región de Valparaíso, pueden prepararse para participar en este nuevo mercado: ¿Qué desafíos deben superar? ¿Qué infraestructura se requiere? ¿Cómo adaptarse desde lo regulatorio y logístico?

El presente estudio se enfoca en responder esas preguntas, con foco en la zona de Quintero, identificando brechas y proponiendo lineamientos que permitan avanzar hacia un corredor marítimo y una plataforma de almacenamiento y distribución de hidrógeno verde y sus derivados.

2.1 Situación actual del Hidrógeno verde en Chile

Chile se posiciona como uno de los líderes mundiales en hidrógeno verde, especialmente dentro de América Latina, gracias a su abundante disponibilidad de recursos renovables como la energía solar y eólica. Desde el año 2021 se han impulsado políticas para acelerar su transición energética, siendo destacado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) como el país con potencial para producir hidrógeno verde a bajo costo en la región.

No obstante, el desarrollo de esta industria enfrenta desafíos tecnológicos y estructurales. Persisten brechas en la utilización eficiente del gas y en la falta de infraestructura local para certificación, instalación y mantenimiento de equipos. En el plano ambiental, aunque el hidrógeno verde genera menos residuos que otras industrias, se requiere un tratamiento adecuado de aguas residuales por los riesgos asociados a su alta inflamabilidad.

A pesar de estos retos, Chile cuenta con ventajas estratégicas que lo posicionan como un actor clave en la transición hacia una economía basada en hidrógeno verde. Sectores como la minería y la industria del acero —que representa cerca del 30% del consumo energético nacional— pueden jugar un papel fundamental en el desarrollo de la cadena de valor del hidrógeno, no solo por su alta demanda energética, sino también por el potencial de descarbonización que ofrecen al reemplazar combustibles fósiles por hidrógeno verde en sus procesos productivos. Además, Chile posee vastas reservas de cobre, un mineral esencial para la fabricación de componentes críticos en la industria del hidrógeno, como los electrodos utilizados en los electrolizadores para la producción de hidrógeno por electrólisis. Esta disponibilidad local de recursos permite fortalecer la integración vertical de la cadena productiva, facilitando la fabricación y mantenimiento de equipos clave y reduciendo la dependencia de insumos importados.

2.2 Potencial actual de puertos chilenos para participar en mercado de Hidrógeno

El informe de GIZ, Subiabre & Sánchez Ingenieros Asociados Limitada (2024) aborda el estado actual y las proyecciones de la infraestructura portuaria en Chile frente al desarrollo de la industria del hidrógeno renovable y sus derivados, como el amoníaco y el metanol, considerando que el sistema portuario actual ha mostrado un proceso de adaptación frente a la carga de proyectos asociados a la energía solar y eólica. Sin embargo, la proyección hacia 2050 plantea desafíos significativos que requieren soluciones específicas para el país, tales como:

- (i) En la Zona Norte, los puertos de Mejillones y Antofagasta emergen como puntos estratégicos para el manejo de hidrógeno renovable y sus derivados. Estos puertos concentran más del 60% de la carga transferida en el país, pero presentan restricciones en permisos y capacidad. Oxiquim, en Mejillones, está desarrollando proyectos de ampliación para atender mayores volúmenes de amoníaco y metanol. La demanda proyectada al 2050 en esta zona incluye 30,3 millones de toneladas de amoníaco, lo que requerirá seis sitios de atraque adicionales y áreas de almacenamiento ampliadas.
- (ii) En la Zona Centro, Valparaíso y Biobío se proyectan como puertos necesarios para el cabotaje y la distribución interna de estos productos. Sin embargo, las limitaciones de infraestructura y los permisos ambientales actuales dificultan su capacidad de respuesta a la creciente demanda.
- (iii) En tanto, la Zona Sur, con la Región de Magallanes como epicentro, es fundamental para las exportaciones internacionales debido a su proximidad a proyectos energéticos y logísticos clave. Terminales como Laredo y J.S. Además, el Terminal Mardones está en proceso de expansión y adaptación para manejar mayores volúmenes de carga.

Tras la revisión de los proyectos portuarios que están operativos en Chile, se puede inferir que el metanol, derivado del hidrógeno, ocupa un lugar destacado en este análisis, así como también el amoníaco, ello se debe a la capacidad que poseen como vectores energéticos, lo que los hace ideales para el transporte y almacenamiento, aunque su manipulación exige estrictas normas de seguridad debido a su inflamabilidad.

Fuster Justiniano, et al. (2022) destacan que Chile tiene un potencial significativo para convertirse en un líder en la producción y exportación de amoníaco y metanol verde gracias a su abundante capacidad de energía renovable y su infraestructura portuaria existente, ya que Chile cuenta con 5 terminales marítimos aptos para amoníaco: Mejillones, Angamos, Monoboya, GNL Quintero, y Cabo Negro, siendo este último además especializado para metanol.

Así mismo, conforme lo señalado anteriormente, la importancia de la zona central de Chile radica en relación del cabotaje de metanol y/o amonio, el cuál requerirá terminales adaptados para manejar naves más pequeñas y garantizar una distribución eficiente y de este modo cumplir con los objetivos propuestos a nivel internacional.

Aun cuando el modelo portuario chileno ha sido eficaz frente a la demanda de carga actual, considerando la importancia de la zona central para ser un punto de cabotaje de los corredores marítimos, es necesario planificar inversiones estratégicas para abordar las brechas que se generan a partir de la nueva demanda. Esto incluye, no sólo la ampliación de terminales, sino además la

incorporación de normativas y protocolos, la colaboración entre actores públicos, privados y comunitarios, sistematización de las múltiples hojas de ruta de la descarbonización en la gestión marítimo-portuaria, entre otros elementos. De este modo, Chile podrá posicionarse como un actor global destacado en la exportación de hidrógeno, amoníaco y metanol verdes, contribuyendo al desarrollo sostenible y a la transición energética mundial.

Por lo anterior, se destacan los siguientes aspectos:

A. Puertos destacados:

- a. En el norte, el puerto de Mejillones (Región de Antofagasta) ya cuenta con infraestructura para manejar gas natural licuado (GNL), incluyendo muelles, tanques de almacenamiento y rutas de transporte.
- b. El puerto de Angamos, también en Mejillones, posee cuatro muelles comerciales y es utilizado por Enaex para importar amoníaco.
- c. En el sur, el terminal de Cabo Negro (Región de Magallanes) tiene capacidad para manejar combustibles como propano y gasolina, y se encuentra estratégicamente ubicado junto al Estrecho de Magallanes para facilitar la exportación de amoníaco hacia los océanos Atlántico y Pacífico.

B. Infraestructura y limitaciones: Aunque existen instalaciones portuarias que podrían adaptarse para el manejo de amoníaco verde, no todos los puertos son aptos para recibir grandes embarcaciones debido a restricciones de eslora y calado. Solo algunos puertos como Mejillones, Quintero y Cabo Negro cumplen con estos requisitos actualmente.

C. Oportunidad para Chile: La posición geográfica y la capacidad de exportar desde puertos en Magallanes y Antofagasta colocan a Chile como un actor estratégico en la ruta y en el comercio de amoníaco verde, especialmente para abastecer mercados internacionales.

D. Desafíos: Será necesario ampliar la infraestructura portuaria existente, desarrollar nuevas capacidades logísticas y asegurar un marco regulatorio adecuado para manejar y exportar hidrógeno verde y sus derivados de manera eficiente y segura. La mayoría de los terminales existentes necesitan ajustes para desarrollar infraestructura de bunkering, que cumpla con las normativas y los objetivos internacionales de descarbonización dados para el año 2050.

2.4. Infraestructura portuaria de Quintero en el contexto nacional

El puerto de Quintero, con su ubicación estratégica en la zona central, infraestructura consolidada y cercanía a proyectos de hidrógeno verde, es un candidato natural para convertirse en un hub logístico y exportador¹. El puerto de Quintero es un actor clave en el comercio exterior chileno, movilizando aproximadamente el 8,0% de la carga total del país y concentrando el 34,2% del granel líquido transferido a nivel nacional. De la carga total que maneja, un impresionante 99,2% corresponde a granel líquido, lo que refleja su especialización y capacidad para manejar productos líquidos a gran escala (Campot, 2023).

La carga transferida y participación de este puerto a nivel nacional, se presenta a continuación:

Figura 1 - Carga en sector Quintero

Localidad	Total transferido anual (ton)*	Carga General y Contenedores	Granel Líquido	Granel Sólido	Reefer
Quintero	8.962.443	75.178	8.886.545	-	720
Participación de la localidad en el Total Nacional	8,0%	0,3%	34,2%	-	0,0%

*Datos al 2023.

Fuente: Elaboración propia en base a información de Aduana (Declaraciones de Salida e Ingreso DUS - DIN).

Fuente: (Campot, 2023)

Esta destacada participación en el manejo de graneles líquidos se sustenta en una infraestructura portuaria que incluye muelles especializados con calados profundos, sistemas avanzados de almacenamiento y transferencia, entre otras. Además, Quintero cuenta con terminales equipados para la manipulación segura de productos químicos y combustibles líquidos, lo que lo posiciona estratégicamente para la transferencia de nuevos vectores energéticos. La creciente inversión en proyectos de hidrógeno verde en la zona, junto con proyectos de energía renovable cercanos, así como la conectividad logística, refuerzan esta proyección. De esta forma, Quintero se podría posicionar como un hub innovador y sostenible para la exportación y distribución de energías limpias, alineándose con las metas nacionales de descarbonización y desarrollo sustentable.

A continuación, en la Tabla 1, se presenta la infraestructura portuaria disponible en Quintero, la cual será base importante para el análisis del presente estudio.

¹ Un hub logístico de exportación de hidrógeno es un puerto o enclave industrial-portuario que se especializa en la consolidación, almacenamiento, transformación y transferencia de hidrógeno verde y sus derivados (como amoníaco o metanol) para su exportación a mercados internacionales.

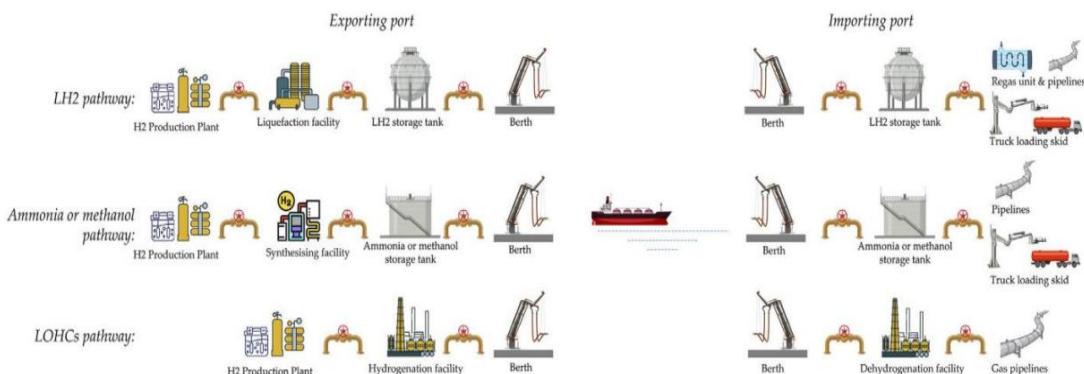
Tabla 1 - Infraestructura portuaria en sector Quintero

Terminal	Propietario	Calado máximo [m]	Eslora máxima [m]	Productos
Muelle Oxiquim S.A	Oxiquim S.A	12,4 Norte	225 Norte	Estireno Monómero/Soda Cáustica/ Xileno/Tolueno/Sulfhidrato de Sodio/M.I.B.C/Frenol/Escaid 10/Isopropanol/Merk/Exxsol D40/Varsol/Poliol/Solveso-100/Acetona/L.P.G/Etilhexilacrilato/Butilacrilato/Prowak 320/Metanol/Ácido Sufúrico/
Boyas Norte y Sur		12,6 Sur	235 Sur	
LPG	Enap Refinerías Aconcagua S.A.	10,2	185	Propano-butano/Productos Limpios
Quintero Multiboya Crudo	Enap Refinerías Aconcagua S.A.	12,9	250	Fuel Oil/Productos Limpios/Crudo/IFO-180
Quintero Monoboya	Enap Refinerías Aconcagua S.A.	21,5	345	Crudo
Quintero terminal Barcaza	Enap Refinerías Aconcagua S.A.	5,5	95,2	IFOS/Diesel Marino
El Bato	Compañía de Petróleos de Chile Copep S.A	12,5		Petróleo Diésel Grado A-1/Kerosene de Aviación/Gasolina
GNL Quinteros	GNL Quinteros S.A	13	250 R.m./IFO-380/Lubricantes	300 GNL

Fuente: (Empresa Portuaria Valparaíso, Plan Maestro Puerto Valparaíso 2023)

Por otro lado, para el desarrollo de una industria del Hidrógeno verde y sus derivados la infraestructura portuaria requerida, se puede reflejar en el siguiente diagrama:

Figura 2 - Infraestructura para la importación y exportación de H2V y sus derivados



Fuente: Peggy Shu-Ling Chen, et al. (2023).

2.3 Objetivos del estudio

El objetivo principal de este estudio ha sido el de proponer aspectos clave para impulsar el desarrollo de una plataforma de almacenamiento y un corredor marítimo para hidrógeno verde y sus derivados en la Región de Valparaíso, que habiliten su almacenamiento, distribución y exportación, generando oportunidades para el desarrollo regional.

Para lograr lo anterior, se ha organizado el trabajo en los siguientes objetivos específicos:

- Describir el ecosistema actual de la industria del hidrógeno verde y sus corredores logísticos.
- Analizar los requerimientos normativos y regulatorios necesarios para su implementación en la región.
- Identificar la infraestructura disponible y las necesidades de inversión para su adecuación.

3. METODOLOGÍA

El desarrollo de este proyecto se llevó a cabo de forma integrada y colaborativa, con la participación de instituciones públicas y fundaciones, entre ellas la Armada de Chile, a través de la Dirección de Programas, Investigación y Desarrollo, y la Fundación Fraunhofer de Alemania. Esta colaboración multisectorial fue clave para abordar el proyecto desde distintas perspectivas, aportando conocimiento técnico, experiencia y visión estratégica que enriquecieron el enfoque del estudio.

Para fortalecer el vínculo entre investigación, educación y sostenibilidad, la Universidad de Valparaíso incorporó activamente a estudiantes de pregrado y postgrado en el desarrollo del proyecto. Esta participación se enmarcó en actividades basadas en proyectos y desafíos y permitió no solo potenciar el aprendizaje práctico de los futuros profesionales, sino también sumar nuevas ideas y enfoques al proceso.

El trabajo metodológico se estructuró de la siguiente manera:

- Diagnóstico inicial: Se levantó información preliminar para identificar las necesidades del proyecto, considerando tanto los aspectos técnicos como los impactos sociales y ambientales. Este paso fue fundamental para definir los objetivos y enfoques prioritarios. Se utilizó una técnica de recolección de datos basada en métodos mixtos, combinando la revisión de estudios y documentos disponibles en la web con entrevistas a actores clave de la industria. Esta estrategia permitió obtener información tanto técnica como contextual para definir los objetivos y prioridades del proyecto
- Revisión documental: Se realizó una exhaustiva revisión de literatura técnica, científica y normativa a través de diversos buscadores bibliográficos, como scopus, wos, etc, relacionada con la cadena de valor del hidrógeno verde. Esto permitió establecer una base sólida para el análisis y definir el marco conceptual del estudio, especialmente en lo referido al potencial de uso de este energético y su impacto en la infraestructura portuaria.
- Entrevistas a actores clave: Para validar y enriquecer la información recopilada, se llevaron a cabo entrevistas con diversos actores del ecosistema energético y logístico. Estas voces entregaron perspectivas prácticas y experiencias concretas que ayudaron a contrastar hipótesis y ampliar la comprensión del contexto actual.
- Sesión participativa con actores del sector: El 17 de diciembre de 2024, en la ciudad de Valparaíso, se realizó una mesa de trabajo con más de 30 representantes de instituciones públicas y privadas. Esta instancia fue diseñada bajo la metodología World Café, que promueve el diálogo colaborativo en pequeños grupos. Los participantes se organizaron en cuatro mesas de conversación, cada una dedicada a uno de los siguientes temas: Cadena de Valor, Normativa, Políticas Públicas y Financiamiento, con participantes de distintas áreas disciplinarias. Este espacio permitió validar hallazgos previos, identificar nuevas oportunidades y visibilizar necesidades no abordadas hasta entonces.
- Análisis e interpretación de resultados: Finalmente, con toda la información reunida — a partir de documentos, entrevistas y discusiones participativas—, se realizó un análisis integral que permitió construir una visión clara y fundamentada sobre los desafíos y

oportunidades que enfrenta la zona de Quintero para integrarse al mercado del hidrógeno verde.

El resultado es el presente informe final, que recoge el trabajo colectivo de un equipo multidisciplinario comprometido con el desarrollo sostenible de la región y con el potencial transformador del hidrógeno verde como vector energético del futuro.

4. CADENA DE VALOR DEL HIDRÓGENO VERDE

El hidrógeno verde ha cobrado un protagonismo clave en la carrera hacia un futuro más limpio y sostenible. A diferencia de otras formas de hidrógeno (como el gris o el azul), que se producen a partir de combustibles fósiles y generan emisiones contaminantes, el hidrógeno verde se obtiene a través de energías renovables como el sol y el viento. ¿El resultado? Un vector energético que no emite CO₂ durante su producción, abriendo un camino real hacia la descarbonización de sectores difíciles de electrificar.

Hablar de hidrógeno verde implica mirar toda su cadena de valor; es decir, el conjunto de etapas que van desde la obtención de la energía renovable, la producción del hidrógeno, su almacenamiento, transporte, transformación en derivados, y finalmente, su uso en distintas industrias. Esta cadena no solo incluye infraestructura técnica, sino también marcos regulatorios, coordinación logística y un fuerte componente social y económico.

4.1 Producción y Desarrollo portuario de Hidrógeno Verde (H₂V)

El hidrógeno verde no es un invento del futuro, es una solución presente, limpia y cada vez más relevante en el proceso por descarbonizar nuestras economías. Pero ¿cómo se produce? Existen diversos caminos tecnológicos, como la fotólisis, la fermentación oscura, la termólisis o la biofotólisis. Sin embargo, hoy la mayoría de las miradas (y las inversiones) están puestas en una tecnología: la electrólisis.

La electrólisis es un proceso que separa el agua (H₂O) en hidrógeno (H₂) y oxígeno (O₂) utilizando electricidad. Y cuando esa electricidad proviene de fuentes renovables como el sol o el viento, se genera hidrógeno 100% limpio: hidrógeno verde. No se emiten gases de efecto invernadero, y el único subproducto es el oxígeno. Todo esto sucede dentro de un equipo llamado electrolizador, que es como una fábrica en miniatura de moléculas verdes, de los cuales existen diversos tipos, pero actualmente, las tecnologías alcalina y PEM son las únicas que están disponibles a escala comercial, listas para producir hidrógeno verde hoy.

Uno de los aspectos clave en el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde en Chile ha sido la logística portuaria, particularmente en zonas extremas del país. La instalación de plantas en regiones como Magallanes ha requerido el uso de maquinaria especializada y soluciones logísticas adaptadas a las dimensiones y especificaciones de los equipos involucrados, particularmente para la generación de la energía necesaria. Esto ha implicado una planificación detallada de las operaciones, que considera la disponibilidad de puertos con espacio y condiciones adecuadas para recibir este tipo de cargas, así como la existencia de procesos logísticos distribuidos que faciliten su transporte desde el arribo hasta el lugar de instalación.

En el caso de la producción del hidrógeno verde en la zona de Punta Arenas, la experiencia acumulada permite ilustrar los ajustes y desarrollos implementados para responder a los requerimientos del sector. Por ejemplo, los terminales operados por ENAP han cumplido un rol fundamental. En Cabo Negro–Laredo se estableció el principal punto de descarga de materiales de construcción y componentes de aerogeneradores. Para ello, se construyó un nuevo muelle, con el objetivo de facilitar la recepción de maquinaria pesada.

El terminal de Gregorio, por su parte, ha sido transformado en un complejo industrial orientado a la producción y despacho de hidrógeno verde, con inversiones que alcanzan los US\$800 millones.

Paralelamente, los puertos de Mardones y Laredo han sido utilizados tanto para el embarque de productos finales —como metanol y gasolina sintética— como para la recepción de insumos durante las fases operativas de los proyectos.

Ante las limitaciones iniciales de capacidad portuaria en el sur de Chile, se exploró además la posibilidad de utilizar puertos en el sur de Argentina, próximos a la Región de Magallanes, como una vía para descongestionar las rutas locales y mejorar la eficiencia logística del proceso de transporte.

En este contexto, el Plan de Desarrollo Logístico de Magallanes, impulsado por el Estado, ha jugado un rol relevante. Esta iniciativa contempla la modernización de la infraestructura portuaria regional, con foco en el aumento de la capacidad de almacenamiento y en la mejora de la conectividad entre el transporte terrestre y marítimo, lo que resulta fundamental para la viabilidad de los proyectos actuales y futuros en la zona. Lo anterior demuestra que esta industria además debe completar el desarrollo logístico y portuario de Chile, ya que uno de los principales desafíos enfrentados fue la limitada capacidad de los puertos locales para recibir y movilizar equipos de gran tonelaje. Esto motivó importantes inversiones en la ampliación de muelles y en la adquisición de grúas especializadas, permitiendo así adecuar la infraestructura a las exigencias del nuevo escenario industrial.

Proyectos emblemáticos como Haru Oni (HIF), emplazado en la Región de Magallanes, priorizaron desde un inicio ubicaciones cercanas a rutas marítimas, con el objetivo de reducir costos de transporte y maximizar el uso de la infraestructura existente. Esta estrategia ha sido clave para asegurar la viabilidad operativa y logística en una región con condiciones geográficas y climáticas desafiantes.

4.2 Derivados del Hidrógeno Verde (H_2V)

Los derivados del hidrógeno verde (H_2V), como el amoníaco y el metanol verde, emergen como alternativas relevantes para la descarbonización del transporte marítimo global, siendo interesante su análisis en relación con las facilidades o desafíos que implica el transporte de largo alcance de estos elementos. En este contexto, los corredores verdes marítimos se perfilan como rutas estratégicas donde se promueve el uso de combustibles cero emisiones, permitiendo que los buques operen con energías limpias a lo largo de rutas específicas de alto tráfico.

4.2.1. Consideraciones sobre vectores energéticos y riesgos asociados

El hidrógeno líquido, amoníaco, metanol y los portadores líquidos de hidrógeno (LOHCs) son vectores con características técnicas y riesgos diferentes que impactan directamente en el diseño y operación marítima y portuaria.

Hidrógeno líquido (LH₂): Aunque es eficiente para el transporte, enfrenta una percepción pública sensible debido a accidentes históricos (como el desastre del dirigible Hindenburg en 1937). Su manejo requiere protocolos estrictos similares a los del gas natural licuado (GNL), dada su inflamabilidad y bajas temperaturas de almacenamiento (Chen et al., 2023).

Amoníaco verde: al combinar hidrógeno con nitrógeno del aire usando el proceso Haber-Bosch, se obtiene un fertilizante sin emisiones, que también puede ser combustible marítimo. Su alta toxicidad y corrosividad demandan materiales y equipos específicos para evitar riesgos en almacenamiento y transporte. Sin embargo, puede reutilizar parte de la infraestructura existente en puertos, aunque la capacidad actual es insuficiente para la demanda proyectada (Chen et al., 2023).

El amoníaco verde destaca por su alta densidad energética y por ser un combustible emergente para el transporte marítimo, además de su uso como fertilizante limpio. Sin embargo, su manipulación requiere estrictos protocolos de seguridad debido a su toxicidad, lo que implica inversiones en infraestructura portuaria especializada para almacenamiento y bunkering.

Metanol verde: se produce al combinar H₂ verde con CO₂ capturado. Es una alternativa limpia para fabricar plásticos, combustibles y otros productos químicos. En cuanto a riesgo, presenta toxicidad para humanos por ingestión o inhalación, pero su impacto ambiental en caso de derrames es menor, ya que se dispersa rápidamente en el mar (Chen et al., 2023). Por otro lado, el metanol verde es un líquido menos tóxico que el amoníaco, más fácil de manejar y compatible con motores marítimos adaptados.

LOHCs (portadores líquidos de hidrógeno): Tienen menor toxicidad y riesgos que el amoníaco o metanol, con manejos de seguridad bien establecidos en puertos, aunque ciertos compuestos como el metilciclohexano (MCH) requieren atención especial por su inflamabilidad (Chen et al., 2023).

La coexistencia de múltiples vectores en un mismo puerto implica desafíos adicionales para la infraestructura y la gestión de riesgos, exigiendo diseños flexibles y protocolos integrados.

4.2.2. ¿Qué son los corredores Verdes?

El desarrollo marítimo-portuario chileno se está preparando activamente para enfrentar los desafíos de la descarbonización planteados en la agenda nacional, que tiene como meta la descarbonización integral de la industria para el año 2050. En este contexto, la estrategia portuaria de Chile no solo busca optimizar la transferencia tradicional de carga, sino también generar elementos diferenciadores que posicionan a sus puertos como nodos clave en la transición energética.

Son rutas entre puertos estratégicos donde navegan barcos que usan combustibles limpios, como hidrógeno verde, amoníaco o metanol verde. Su objetivo es reducir las emisiones del transporte marítimo, probar nuevas tecnologías sostenibles y avanzar hacia la descarbonización global al 2050.

Así, la propuesta chilena apunta a que los buques que arriben a sus costas no sólo realicen operaciones de carga y descarga convencionales, sino que también participen en actividades de suministro y transferencia segura de combustibles descarbonizados, como hidrógeno verde, amoníaco verde y otros vectores energéticos limpios. Esto permitirá que los puertos nacionales se consoliden como hubs logísticos regionales especializados en la cadena de valor de energías limpias, facilitando el desarrollo de corredores marítimos verdes que promuevan el transporte marítimo con bajas o nulas emisiones.

Desde que Chile firmó la Clydebank Declaration en el año 2021², ha liderado el desarrollo de estos corredores, trabajando con instituciones nacionales e internacionales para estudiar su viabilidad técnica, regulatoria y financiera.

Corredores identificados en Chile:

² La Clydebank Declaration es una iniciativa internacional lanzada en noviembre de 2021 durante la Conferencia de la ONU sobre el Cambio Climático (COP26) en Glasgow, Escocia. Esta declaración establece un compromiso conjunto de varios países para acelerar el desarrollo y la construcción de corredores marítimos verdes, promoviendo la descarbonización del transporte marítimo internacional mediante la implementación de combustibles limpios y tecnologías sostenibles.

- Mejillones – Países Bajos: Conecta la producción de hidrógeno verde en Antofagasta con puertos europeos, como Rotterdam. Busca fomentar el comercio de energías limpias y posicionar a Chile como exportador.
- Magallanes – Fiordo de Aysén: Apunta a descarbonizar el transporte local, como el de la industria acuícola, con el uso de embarcaciones con hidrógeno en el extremo sur del país.
- Zona central – Mercados internacionales: La región de Valparaíso, donde se ubica el puerto de Quintero, es clave para el desarrollo de plataformas logísticas para almacenamiento y distribución de hidrógeno verde y sus vectores energéticos. Se estudia la factibilidad de establecer corredores marítimos desde esta zona hacia mercados globales, apoyando la exportación y el desarrollo económico regional. Este corredor aprovechará la infraestructura portuaria consolidada y la cercanía a centros industriales, integrando a actores como la Armada, puertos y academia.

El país busca potenciar estos corredores, ya que pueden generar beneficios, tales como:

- Reducir emisiones del transporte marítimo.
- Permitir probar nuevas tecnologías limpias.
- Impulsar la economía verde, creando empleo e inversión.
- Fomentar la cooperación internacional y la transferencia tecnológica.

Considerando el tema de los corredores en Chile, el país ha venido desarrollando iniciativas que le permitan posicionarse, como es el caso de la cooperación con el Centro Maersk Mc-Kinney Moller para el Transporte Marítimo Cero Carbono y la firma de acuerdos internacionales para corredores verdes (ejemplo: Mejillones-Países Bajos); de esta forma, se aprecian avances significativos en el desarrollo de corredores marítimos verdes que permitirían transportar estos vectores de manera eficiente y sostenible.

Sin embargo, la consolidación de este tipo de corredores marítimos verdes que permitan transportar hidrógeno y sus derivados a larga distancia aún requiere la realización de pruebas piloto y la superación de desafíos técnicos y regulatorios asociados al almacenamiento, manipulación y transporte seguro de estos combustibles. Si bien Chile está avanzando rápidamente en el desarrollo de plantas de hidrógeno verde, el proceso de distribución a larga distancia, especialmente mediante corredores de cabotaje marítimos verdes, aún requiere estudios que permitan optimizar el transporte de este material. En este contexto, y como dato no menor, aún muchas empresas del sector marítimo-portuario se plantean cuál de los vectores energéticos derivados del hidrógeno, principalmente el amoníaco o el metanol verde, resulta más conveniente para movilizar por vía marítima en largas distancias.

El desafío actual radica en cerrar la brecha tecnológica y económica para que estos corredores sean competitivos frente a las rutas tradicionales. Para ello, se están impulsando pruebas y estudios de factibilidad que analizan las mejores prácticas para el manejo seguro, el almacenamiento eficiente y la logística óptima de amoníaco y metanol verde en puertos chilenos. Aquí se incluye la infraestructura necesaria para su exportación desde Quintero hacia mercados globales, ya que muchos de los proyectos actuales de buques propulsados por hidrógeno emplean pilas de

combustible que utilizan hidrógeno puro, ya sea en estado líquido o comprimido. Estos son especialmente comunes en embarcaciones de corta a media distancia, como ferris y remolcadores, donde el almacenamiento y manejo del hidrógeno es menos complejo; por ejemplo, el ferry MV Sea Change en San Francisco opera con hidrógeno puro mediante pilas de combustible. De ahí que este punto implica un desafío para la estrategia del hidrógeno en Chile y una mirada muy específica para la Armada de Chile que debe aplicar las directrices indicadas por la OMI al movimiento de estos vectores largas distancias por vía marítima.

En este sentido la región de Valparaíso, donde se ubica Quintero, es estratégica para el desarrollo de plataformas logísticas y corredores de largas distancias, que faciliten el almacenamiento y distribución nacional e internacional de hidrógeno y sus derivados, siguiendo la línea estratégica de la cercanía a las instalaciones portuarias que faciliten la distribución de estos.

4.3 Logística del Hidrógeno: Almacenamiento, Adecuación y Transporte

Producir hidrógeno es solo una parte del desafío. Transportar de forma eficiente, segura y competitiva, es lo más complejo en este proceso amplio, de acuerdo con el resultado de las entrevistas realizadas en el marco de este proyecto, más aún si se considera que las fuentes de producción están alejadas de las zonas de consumo de este tipo de energía, y es acá donde se genera el mayor desafío en el ámbito de la ingeniería, la logística, la normativa y costos, pero sobre todo se generan las mayores oportunidades para Chile.

4.3.1. Almacenamiento y adecuación

El transporte del hidrógeno, en su forma elemental, representa un desafío en el escenario actual, debido a las restricciones normativas, o falta de ellas, la disponibilidad limitada de buques especializados y las condiciones técnicas que implica su manipulación. Frente a esta complejidad, se han desarrollado soluciones que permiten transportar el hidrógeno de manera más segura y eficiente mediante el uso de compuestos denominados portadores.

Entre los más relevantes se encuentran los portadores líquidos, como los LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carriers), el metanol y el amoníaco. Estos permiten manejar y transportar el hidrógeno de forma similar al petróleo, y otros químicos, lo que facilita su integración en las infraestructuras logísticas ya existentes. En particular, los LOHC se comporta como un líquido convencional, no requiere refrigeración y ofrece ventajas significativas en términos de seguridad y facilidad de manejo.

En Chile, uno de los proyectos más destacados relacionados con la producción y desarrollo de portadores líquidos de hidrógeno está vinculado a la colaboración entre varios institutos Fraunhofer de Alemania y socios locales, que trabajan en la investigación y establecimiento de la producción a gran escala de hidrógeno verde y sus derivados, incluyendo combustibles líquidos como el metanol verde y el éter dimetílico (DME), que son tecnologías relacionadas con LOHC. Este proyecto, contempla la construcción de una planta piloto en el norte de Chile para producir estos combustibles a partir de hidrógeno verde, utilizando energía solar y CO₂ capturado de una cementera local. Este desarrollo forma parte del proyecto Power-to-MEDME, que busca aprovechar el potencial solar y la infraestructura existente para la producción y uso local e internacional de estos portadores de hidrógeno líquidos.

Otra forma común de transporte es el hidrógeno gaseoso comprimido, ideal para aplicaciones móviles como vehículos livianos, autobuses o sistemas de distribución a pequeña escala. Este tipo

de hidrógeno puede ser transportado a través de tubos dedicados, conocidos como hidro ductos, que permiten su distribución de forma continua y eficiente.

Finalmente, el hidrógeno también puede ser transportado en estado líquido (LH_2), lo que implica mantenerlo a temperaturas extremadamente bajas, cercanas a los -253 °C. Aunque este método requiere una infraestructura criogénica especializada, su alta densidad energética lo convierte en una opción viable para sectores como la aviación y para exportaciones a gran escala, donde la eficiencia volumétrica es un factor clave.

Aunque el proyecto, actualmente en fase de planificación, no contempla un desarrollo industrial masivo exclusivo para portadores líquidos orgánicos de hidrógeno, ni proyecta su exportación directa, sí considera el consumo local como punto de partida. No obstante, la capacidad portuaria existente permite explorar, en este estudio, el potencial de transformar a Quintero en un centro de distribución hacia otros mercados, tanto a nivel nacional mediante cabotaje, como internacional a través del transporte marítimo.

Dado que el hidrógeno en estado puro presenta importantes desafíos logísticos para su transporte a larga distancia, el análisis considera su conversión a vectores energéticos más estables y densos, como el amoníaco y el metanol verdes. El primero, producido mediante la síntesis de hidrógeno y nitrógeno atmosférico (proceso Haber-Bosch), es considerado un combustible limpio emergente para el transporte marítimo y una materia prima clave para la industria de fertilizantes. El segundo, obtenido al combinar hidrógeno con CO_2 capturado, permite aplicaciones sostenibles en la producción de plásticos, combustibles y compuestos químicos.

Si se considerara la adecuación de estos vectores, la infraestructura de Bahía Quintero debiese incorporar tanques especializados y sistemas de seguridad para almacenamiento y transferencia. Estas adaptaciones posicionan a la bahía como una plataforma logística clave para la exportación de combustibles limpios, consolidando su rol no solo como punto de consumo local, sino como eje de conexión de la producción nacional de hidrógeno verde con mercados internacionales.

4.3.2. Transporte

El transporte de hidrógeno verde desde los centros de producción hasta los mercados de consumo es un factor considerable que puede definir su competitividad internacional. La elección del sistema de transporte depende principalmente de la distancia a recorrer y de las infraestructuras disponibles, siempre con el objetivo de optimizar la eficiencia y reducir costos.

Transportar hidrógeno no es una tarea simple: no existe un único método ideal, sino diferentes alternativas que deben adaptarse a las particularidades de cada proyecto y mercado. Además, factores como la logística, las pérdidas de energía en el proceso y el costo total de suministro, juegan un rol determinante.

Principales formas de transporte:

- **Carretera:** Para distancias cortas, como en el caso de la "última milla", el hidrógeno se transporta en camiones cisterna. Estos vehículos llevan hidrógeno comprimido (entre 360 y

1.100 kg) o hidrógeno líquido (entre 360 y 4.300 kg), utilizando tanques de alta presión o de doble pared para evitar la evaporación.

- **Tuberías:** Para grandes volúmenes y distancias más largas, el uso de tuberías es una opción eficiente. El hidrógeno puede inyectarse en las redes existentes de transporte de gas natural, aunque esto requiere adaptaciones técnicas específicas. También existe la opción de construir redes exclusivas de "hidroductos", aunque estas demandan inversiones considerables y solo serían viables si el crecimiento de la demanda de hidrógeno lo justifica. Una posibilidad adicional es el "blending", es decir, mezclar hidrógeno con gas natural en las tuberías actuales. Sin embargo, esto puede diluir el valor del hidrógeno renovable y plantea desafíos técnicos para separar los gases en el destino.
- **Ferrocarril:** Los trenes permiten trasladar volúmenes mayores que los camiones, con cisternas capaces de llevar entre 2.900 y 9.100 kg de hidrógeno.
- **Transporte marítimo:** Para distancias transoceánicas, el transporte en buques especializados es fundamental. Un barco puede mover hasta 70 toneladas de hidrógeno en forma líquida (LH_2). No obstante, este método exige procesos costosos de licuefacción en el origen y regasificación en el destino.

Bajo estos conceptos se destacan 2 aspectos, según la Estrategia Nacional de Hidrógeno verde de Chile, las zonas que cuenta con mayor capacidad productiva de este tipo de energía son la zona norte de Chile y Zona sur (Mejillones y Punta Arenas); por ello, es que para abastecer a las zonas industriales ubicadas en el centro del país, es fundamental contar con modelos de transporte nacional previamente definidos en las estrategias de uso de este tipo de combustibles. Esta distribución se propone principalmente a través de una combinación de corredores logísticos integrados que consideran transporte marítimo (cabotaje), terrestre (ferrocarril y carretera) y almacenamiento estratégico en puertos intermedios.

Aspectos clave de la distribución según la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde y documentos asociados:

- Corredores marítimos de cabotaje: La producción en Mejillones y Punta Arenas se conectará con puertos centrales y del centro-sur (como Quintero y Valparaíso) mediante rutas marítimas de cabotaje. Esto aprovecha la extensa costa chilena y la infraestructura portuaria para transportar hidrógeno y sus derivados (amoníaco, metanol). En este sentido, es relevante contar con mayor integración de instituciones como la marina mercante nacional en la discusión de estos tópicos, ya que de ellos dependerá en gran medida el transporte local de este tipo de combustibles. Desarrollar propuestas de conversión, apoyo en el diseño de flotas, entre otros factores son relevantes para llevar este tema a una discusión seria.
- Infraestructura portuaria estratégica: Puertos como Quintero, Valparaíso, San Antonio y Mejillones pueden ser considerados como nodos logísticos clave para almacenamiento, redistribución y exportación. En particular, Quintero se proyectaría como un hub para recibir hidrógeno producido en otras regiones y distribuirlo hacia la zona central y mercados internacionales.
- Transporte terrestre complementario: Desde los puertos, el hidrógeno y sus derivados se transportarán por carretera y ferrocarril hacia centros industriales, mineros y urbanos,

garantizando la cobertura nacional. La integración multimodal es esencial para optimizar costos y tiempos.

- En general, en Quintero, la inyección de hidrógeno en redes existentes de gas natural (blending) es una opción técnica posible, de hecho, inicialmente en el proyecto que está desarrollando GNL Quintero en la zona se consideraba, pero requiere regulación específica, aún en desarrollo, y adaptaciones técnicas para evitar problemas de seguridad y eficiencia.
- Almacenamiento y conversión: Se desarrollarán plataformas de almacenamiento y plantas de conversión (por ejemplo, para amoníaco o metano verde) en puntos estratégicos para facilitar la logística y reducir riesgos asociados al transporte de hidrógeno puro.

4.3.3. Factores que impactan el costo del transporte del hidrógeno y derivados.

El costo final de estos “nuevos combustibles” es otro de los elementos a considerar, ya que depende de tres variables principales: el tipo de portador de hidrógeno utilizado (gas, líquido, amoníaco, LOHC, entre otros), el volumen transportado y la distancia. Cada uno de estos elementos se hace fundamental al momento de decidir sobre una estrategia u otra.

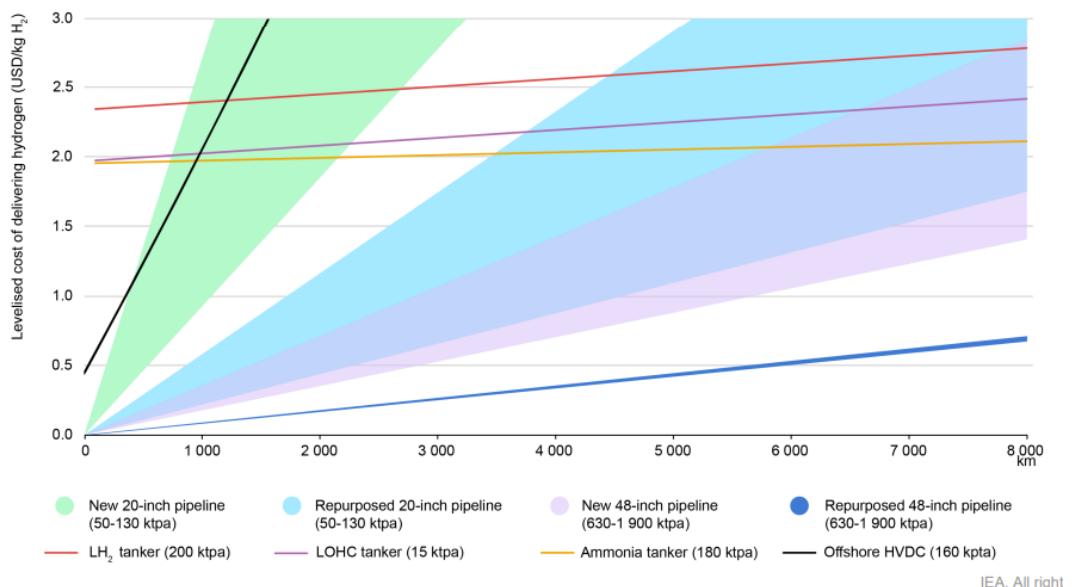
Así mismo, las pérdidas de energía durante el transporte también deben ser consideradas, ya que varían según la tecnología y afectan la cantidad de hidrógeno disponible para su uso final.

Estudios recientes, como los de la Agencia Internacional de Energía (IEA) basados en Guidehouse e IAE, han analizado los costos nivelados de entrega de hidrógeno para distintas distancias proyectadas al año 2030. Entre las opciones evaluadas se encuentran:

- Gasoductos nuevos o adaptados (de diferentes diámetros).
- Transporte marítimo en tanques de hidrógeno líquido (LH_2).
- Uso de portadores orgánicos líquidos (LOHC).
- Transporte de amoníaco.
- Transmisión de electricidad en corriente continua de alta tensión (HVDC) para producción local de hidrógeno vía electrólisis.

A continuación, se ilustran los costos generados por vectores por kilómetro recorrido.

Figura 3 - Costos de transporte de hidrógeno y derivados para distintas distancias



Fuente: Información extraída desde Agency, Global Hydrogen review 2022 (2022)

Los resultados muestran que los gasoductos de menor diámetro (20 pulgadas) incrementan rápidamente su costo a medida que aumenta la distancia, mientras que los de mayor diámetro (48 pulgadas) tienen costos más estables a largas distancias. El transporte marítimo en tanques de LH₂ mantiene un costo casi constante, en tanto que los envíos en LOHC o amoníaco son algo más costosos, pero siguen una tendencia similar. La transmisión eléctrica HVDC presenta un aumento gradual en costos conforme crece la distancia.

Por lo tanto, para la distribución desde o hacia Quintero, se recomienda un esquema multimodal que priorice la producción local en la zona central, apoyada con gasoductos de gran diámetro para distribución terrestre regional, y transporte marítimo para conexiones de larga distancia y exportación. Este enfoque balancea costos, seguridad y flexibilidad logística, alineándose con las condiciones y proyecciones del proyecto Hidrógeno Verde Bahía Quintero.

5. HIDRÓGENO EN EL TRANSPORTE MARÍTIMO.

La llegada del hidrógeno (H₂) a los puertos representa mucho más que la incorporación de una nueva mercancía; es una oportunidad estratégica para transformar los puertos y su entorno en espacios de desarrollo comercial más sostenibles y resilientes.

El amoníaco, por su parte, se transporta en barcos similares a los que llevan gas licuado de petróleo (LPG), aunque con mayores medidas de seguridad por su toxicidad. Sin embargo, su baja densidad hace que no se aproveche bien el espacio en las bodegas.

Actualmente, la mayoría de los buques utilizan combustibles fósiles tradicionales que generan altas emisiones contaminantes. Sin embargo, esta realidad está en rápida transformación; desde 2020, la Organización Marítima Internacional (OMI) y la Unión Europea han establecido metas ambiciosas

para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector marítimo, con objetivos claros hacia 2050 y mecanismos de sanción para quienes no cumplan con estos estándares.

Las alternativas de combustibles más limpios para la propulsión marítima incluyen:

- Electrificación: Solución limpia y sin emisiones, aunque limitada a embarcaciones pequeñas y operaciones cercanas a la costa debido a restricciones de autonomía y capacidad de almacenamiento.
- Biocombustibles: Compatibles con la infraestructura actual y con buena densidad energética, pero su disponibilidad es limitada para cubrir toda la demanda marítima.
- Hidrógeno: Utilizado en celdas de combustible para barcos pequeños y medianos, con potencial para hidrógeno líquido en embarcaciones mayores, aunque aún enfrenta desafíos técnicos, normativos y logísticos significativos.
- Metanol y combustibles sintéticos: Fáciles de manejar y con buena densidad energética, su viabilidad depende del desarrollo tecnológico y la reducción de costos en su producción.
- Amoníaco: Destacado por su alta densidad energética, costos competitivos y avances en motores adaptados, posicionándose como una de las opciones más prometedoras para la descarbonización marítima.

Para que estas alternativas sean efectivas, es imprescindible desarrollar una infraestructura robusta que incluya plantas de producción, estaciones de carga y servicios de mantenimiento, aspectos que están en etapas iniciales y requieren inversiones significativas.

En términos de embarcaciones, ya existen proyectos piloto y operativos que demuestran la viabilidad de combustibles alternativos:

- Barcos impulsados por hidrógeno:
 - *FPS Waal* (Países Bajos), que navega con celdas de combustible.
 - *Zulu06* (Francia), que utiliza hidrógeno comprimido.
 - *Sea Change* (EE. UU.), ferry en San Francisco impulsado por hidrógeno.
 - *Hydroville* y *Hydrobingo*, ferris en Bélgica y Japón respectivamente.
 - *Hydrotug 1*, remolcador belga con motor dual hidrógeno-diésel.
- Barcos impulsados por amoníaco:
 - *Yara Eyde*, primer portacontenedores a amoníaco entre Noruega y Alemania, previsto para 2026.
 - *Viking Energy*, buque de suministro adaptado para amoníaco en el Mar del Norte.
- Barcos impulsados por metanol verde:
 - *Antonia Maersk*, gran portacontenedores que opera con metanol en rutas Asia-Gotemburgo desde 2024.
 - Dos buques de 1.300 TEU que operarán en el Mar del Norte desde 2024.

En el transporte marítimo, se busca maximizar la cantidad de energía trasladada en el menor espacio posible. En este contexto, el hidrógeno presenta desafíos, ya que, aunque posee una alta energía por kilo, su baja densidad lo hace menos eficiente en términos de volumen ocupado dentro de una nave, comparado con otros combustibles tradicionales.

La viabilidad de transportar hidrógeno por mar depende del tipo de portador utilizado y de su competitividad frente a opciones como el gas natural o la gasolina. Según el estudio realizado por Gasnam-Neutral Transport (2023), donde se presenta la herramienta HYDROMAR, los portadores que pueden transportarse a temperatura ambiente, como el hidrógeno comprimido, los LOHC y el metanol, simplifican la logística y reducen costos. El amoníaco también puede mantenerse a temperatura ambiente, pero tiene requerimientos respecto de la presión, lo cual complica su manejo en grandes volúmenes. Por otro lado, opciones como el hidrógeno y el amoníaco en estado líquido requieren refrigeración especial, lo que encarece y complejiza el transporte.

Actualmente no existen embarcaciones adecuadas para transportar hidrógeno comprimido por mar a gran escala. El hidrógeno licuado sí puede trasladarse en tanques criogénicos especiales, pero estos tienen poca capacidad y requieren más viajes para mover la misma cantidad de energía que otros combustibles, lo que reduce su eficiencia. Como es el caso del buque Suiso Frontier³, que está diseñado para transportar hidrógeno en forma de hidrógeno licuado (LH₂). Este hidrógeno se mantiene a una temperatura criogénica de aproximadamente -253 °C, lo que permite reducir su volumen en un factor de 800 veces respecto al hidrógeno en estado gaseoso, facilitando su almacenamiento y transporte a gran escala por mar.

El Suiso Frontier, fue construido por Kawasaki Heavy Industries en su astillero de Kobe entre junio y diciembre de 2019, es un buque de 116 metros de eslora por 19 metros de manga, tripulado por 25 personas, tiene una capacidad para transportar 1.250 metros cúbicos de hidrógeno licuado, equivalente a unas 75 toneladas de hidrógeno por viaje. Para mantener el hidrógeno en estado líquido, el buque cuenta con una tecnología avanzada de aislamiento térmico de doble capa con vacío entre ellas, utilizando plástico reforzado con fibra de vidrio de alta resistencia (CFRP), y un sistema de enfriamiento que garantiza la conservación del hidrógeno a la temperatura requerida durante largos trayectos.

En cuanto a su propulsión, el Suiso Frontier utiliza un sistema híbrido con tres generadores diésel y dos motores eléctricos, que le permiten navegar a una velocidad máxima de 13 nudos, cumpliendo con las regulaciones internacionales de emisiones.

Este buque es pionero a nivel mundial, siendo el primero construido específicamente para el transporte marítimo de hidrógeno licuado, y ha realizado viajes históricos entre Australia y Japón como parte del Proyecto de Cadena de Suministro de Energía de Hidrógeno (HESC), demostrando la viabilidad técnica y comercial del transporte seguro y eficiente de hidrógeno a larga distancia por mar.

³ Suiso significa hidrógeno en japonés

Figura 4 - Buque Suiso- Frontier



Fuente: The Suiso Frontier - HESC (2020)

Del mismo modo, se destacan los buques de la empresa CMB.Tech, una empresa marítima con sede en Amberes, Bélgica. Es un grupo diversificado que lidera la descarbonización en la industria marítima, operando una flota de más de 160 buques y desarrollando soluciones de bajas emisiones basadas en hidrógeno y amoníaco para aplicaciones marinas e industriales los cuales transportan y utilizan el hidrógeno principalmente en forma comprimida para propulsión y operaciones marítimas. Por ejemplo, su remolcador Hydrotug 1, el primero del mundo impulsado por hidrógeno, almacena alrededor de 415 kg de hidrógeno comprimido en tanques ubicados en cubierta, distribuidos en seis bodegas. Este hidrógeno comprimido alimenta motores de combustión dual (hidrógeno y combustible tradicional) que reducen significativamente las emisiones de CO₂.

Además, CMB.Tech está desarrollando una flota de buques cisterna y graneleros equipados con tecnologías de propulsión basadas en combustibles limpios como el amoníaco verde, que puede ser utilizado directamente o descompuesto para liberar hidrógeno para la combustión. Esta estrategia forma parte de su plan para alcanzar cero emisiones netas en la industria naviera para 2050.

Estos ejemplos internacionales sirven de referencia para Chile, que cuenta con ventajas geográficas y un ecosistema energético en expansión para convertirse en un hub estratégico de hidrógeno verde y combustibles marítimos sostenibles.

Finalmente, el desarrollo de corredores marítimos verdes en Chile no solo contribuye a la reducción de emisiones globales, sino que también impulsa la economía local, genera empleo verde y fortalece la posición del país en la transición energética mundial. La colaboración público-privada, el financiamiento internacional y la innovación tecnológica serán impulsoras para materializar esta visión hacia 2030 y más allá.

5.1. Situación Actual de las Rutas Marítimas para el Transporte de Hidrógeno y sus Derivados como Carga

Para determinar las posibilidades que ofrece el transporte y/o uso del Hidrógeno verde en la industria marítima portuaria, es necesario determinar las posibles rutas marítimas que se espera desarrollar a medida que crece el mercado del hidrógeno y sus derivados.

La Agencia Internacional de Energía (IEA) estima que para 2030 las exportaciones globales de hidrógeno alcanzarán los 12 millones de toneladas anuales (Mt/año), y Chile podría aportar más de 1 Mt/año.

Proyecciones más optimistas elevan esa cifra a 16 Mt H₂ –equivalente para 2030, y a 25 Mt H₂–equivalente para 2040, lo que significa más del 40% de toda la producción planificada de hidrógeno de bajas emisiones. Esto muestra el fuerte potencial exportador en el desarrollo de este mercado.

Del mismo modo, el año 2023 la IEA identificó 1.980 proyectos relacionados con hidrógeno limpio. De estos, se espera que 1.513 estén operativos en 2030, incluyendo 181 proyectos enfocados en la producción de amoníaco. Sin embargo, el avance ha sido lento. Aunque ha habido un aumento del 25% en los proyectos anunciados, solo tres están en fases avanzadas a nivel mundial:

- NEOM (Arabia Saudita)
- Green Hydrogen and Chemicals SPC (Oman)
- CF Industries (EE. UU.)

El 75% de los proyectos mundiales, siguen en etapas tempranas, y menos del 30% cuenta con compradores identificados. El éxito de estos proyectos dependerá de inversiones en infraestructura y acuerdos de compraventa a largo plazo.

Lo importante es que Chile destaca como uno de los países con mayor número de iniciativas, especialmente en producción de amoníaco e hidrógeno, junto a Australia.

Tabla 2 - Proyectos de hidrógeno verde por país

País	Amoníaco	CH4	H2	LOHC	MeOH	Synfuels	Varios	Total
Australia	17	2	64	1	1	1	1	86
Chile	17		26	1	2	1	1	47
China	11		45	5			1	62
Alemania	1	19	125	7	10	3	3	165
Dinamarca	2	11	27	9	1	2	2	52
España	7	2	82	5	2	3	3	101
Francia	1	5	105	2	4	3	3	120
Reino Unido			84		2	3	3	89
India	14		55	1				70

País	Amoníaco	CH4	H2	LOHC	MeOH	Synfuels	Varios	Total
Países Bajos	3	1	65		1	3	1	74
Noruega	8		24		1	4	1	38
EEUU	20	3	89		4	2	2	120
Otros	80	24	353	1	12	5	14	489
Total	181	67	1.144	1	49	36	35	1.513

Fuente: IEA (2023)

Respecto del uso del buque Suiso Frontier, se utiliza para transportar hidrógeno líquido (LH2) entre Australia y Japón, recorriendo una distancia de aproximadamente 9.000 km. El viaje dura alrededor de 16 días, y el proceso logístico es el siguiente:

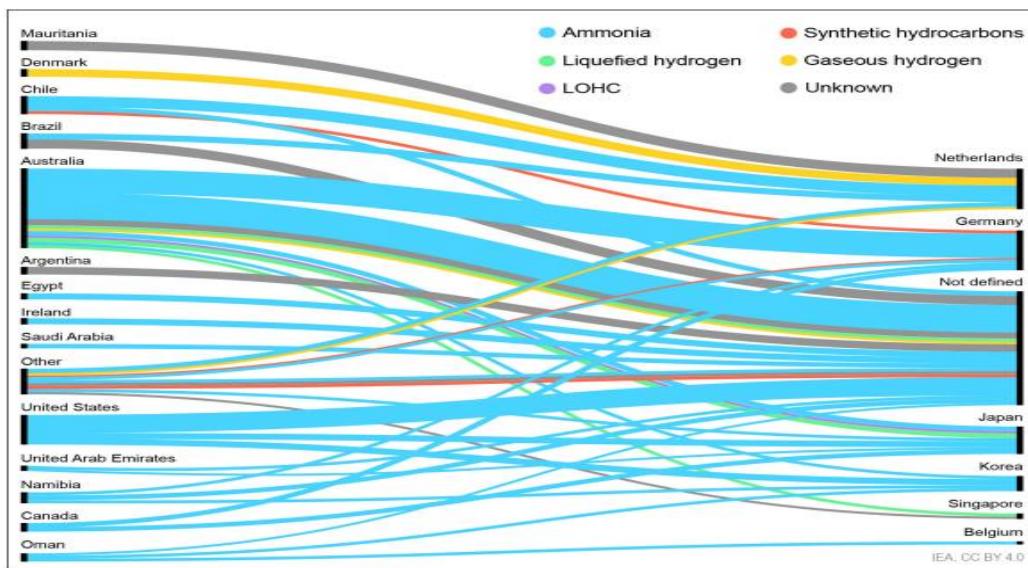
- El hidrógeno se produce y licua en Australia, específicamente en el puerto de Hastings Victoria.
- Se almacena en Australia en tanques criogénicos de alta tecnología dentro del buque.
- El hidrógeno se descarga en Japón, en el puerto de Kobe en la terminal de regasificación Hy touch Kobe, operada por Iwatani Corporation, para su uso en generación eléctrica y otros fines industriales.

Chile podría replicar estos modelos de implementación de rutas, pero para desarrollarlo se requeriría claridad en las estrategias de distribución, inversión en infraestructura portuaria para licuefacción, almacenamiento y carga de hidrógeno líquido, además de colaboración público-privada y regulatoria.

5.2. Demanda

Según un informe de la Agencia Internacional de Energía (IEA) – tal como se explica en la Figura 5– para 2030 se proyectan varios flujos comerciales internacionales de hidrógeno de bajas emisiones, basados en los proyectos actualmente anunciados. Estos flujos conectan Australia con Europa y el mercado asiático, especialmente Japón y Corea, mientras que América Latina se vincula principalmente con Europa y América del Norte con Asia. Se prevé que, en estas rutas comerciales, el amoníaco será el principal portador para el transporte de hidrógeno, con Chile desempeñando un papel clave en la exportación a los Países Bajos. Este escenario refleja la creciente relevancia de Chile en el mercado global de hidrógeno verde debido a su infraestructura energética renovable y sus recursos naturales de alta calidad.

Figura 5 - Rutas de Transporte y Perspectivas de Exportación de Hidrógeno Verde en Chile



Fuente: Agency, Global Hydrogen Review (2023)

En cuanto a la competitividad de Chile frente a otras regiones productoras, algunos expertos resaltan que el país podría enfrentar desafíos económicos en relación con los costos de producción y transporte. Por ejemplo, la importación de amoníaco verde desde Chile a Corpus Christi (Texas) sería significativamente más costosa que la producción local en esa región, debido a factores como el costo del hidrógeno verde en Texas y los menores costos de transporte y distribución. A pesar de esto, en otros mercados, como Singapur, el amoníaco verde proveniente de Chile podría ser más competitivo, especialmente si los costos de producción en el Golfo de EE. UU., Chile y Australia se alinean, resultando en una opción más barata que la producción local.

El mercado global de amoníaco, que se utiliza no solo en la producción de fertilizantes, sino también en industrias como la textil, ha mostrado una tendencia al alza. Se estima que este mercado alcanzará los 188 millones de toneladas en 2024 y crecerá a una tasa compuesta anual del 1,88%, alcanzando los 206 millones de toneladas en 2029. Esto refleja un escenario de alta demanda, impulsado por el consumo en países como China, India y Japón, donde el amoníaco es crucial tanto en la producción de fertilizantes como en la industria textil, destacándose Japón por su capacidad en la fabricación de textiles técnicos.

6. NORMATIVA Y REGULACIÓN

6.1. Regulación y estándares portuarios para transferencia de hidrógeno

El transporte del hidrógeno y sus derivados a través de los puertos se encuentra sujeto a una serie de regulaciones y estándares diseñados para gestionar los riesgos asociados, en el que la incertidumbre regulatoria y la falta de estándares específicos podría ser considerado como un obstáculo para implementar el comercio internacional de H2.

Diversos estudios han identificado las regulaciones y estándares para el mantenimiento de Hidrógeno y sus derivados en los puertos, destacando las siguientes regulaciones y estándares en países como: Australia, Chile, Arabia Saudita, Noruega, países de la UE, Reino Unido, Japón, Corea del Sur y Singapur, destacando:

Tabla 3 - Regulaciones y estándares del Hidrógeno y sus derivados

País	Regulación	Avances y Desafíos
Australia	Se requiere aprobación en niveles locales, estatales y federales para infraestructura de hidrógeno.	Adopción de 8 estándares internacionales en 2020, incluyendo seguridad, diseño y estaciones de recarga Lagunas regulatorias para puertos y procesos simplificados para acelerar el desarrollo de proyectos.
Noruega	Manejo de hidrógeno bajo el Reglamento sobre Sustancias Peligrosas, exigiendo evaluaciones de riesgos y distancias de seguridad.	Falta de un marco regulatorio definido y necesidad de restricciones espaciales en instalaciones portuarias.
Unión Europea	Iniciativas regulatorias como la reforma de la Directiva de Gas de 2009 y el reemplazo de la AFID para armonizar la infraestructura de H2.	Armonización con estándares internacionales (ISO, IEC) y europeos (EN). Sin embargo, los estándares para LH2 son insuficientes y necesitan revisiones.
Reino Unido	El hidrógeno está cubierto por el Gas Act de 1986 y regulaciones de seguridad como las Pipeline Safety Regulations de 1996 y las COMAH de 2015. ADR regula el transporte por carretera de hidrógeno.	
Japón	Hidrógeno regulado como gas a alta presión bajo la Ley de Seguridad de Gases a Alta Presión y la Ley de Servicios de Bomberos.	Desarrollo de estándares internacionales como la norma ISO/DIS 24132 para transferencia marina de LH2.
Corea del Sur	La Ley de Gestión de la Seguridad del Hidrógeno regula la producción, manejo,	

País	Regulación	Avances y Desafíos
	importación y exportación de componentes relacionados con el hidrógeno desde 2021.	
Singapur	Hidrógeno tratado como material inflamable bajo la Ley de Seguridad contra Incendios. Regulación del transporte bajo la Ley de la Autoridad Marítima y Portuaria.	Iniciativa de 2021 para acelerar la adopción de H2, desarrollando infraestructura y requisitos de seguridad para almacenamiento y transporte.

Fuente: Peggy Shu-Ling Chen, et al. (2023).

Es importante destacar que Chile cuenta con un marco normativo y regulatorio en desarrollo para el hidrógeno verde y sus derivados en el ámbito marítimo-portuario, orientado a garantizar la seguridad, sustentabilidad y promoción de esta industria emergente. Los principales elementos normativos y políticas públicas vigentes o en avance son:

- **Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde (ENHV):** Establece la hoja de ruta para desarrollar una industria sostenible de hidrógeno verde en Chile, incluyendo la certificación internacional de origen y huella de carbono, y la promoción de infraestructura habilitante, como puertos y sistemas logísticos para el manejo seguro y eficiente del hidrógeno y sus derivados.
- **Reglamento de Seguridad de Instalaciones de Hidrógeno (Decreto Supremo N°13, junio 2024):** Define los requisitos mínimos de seguridad para el diseño, construcción, operación y mantenimiento de instalaciones de hidrógeno, incluyendo producción, almacenamiento, transferencia y consumo. Este reglamento es clave para proyectos portuarios que involucren hidrógeno, estableciendo responsabilidades claras y agilizando trámites de autorización, bajo fiscalización de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC).
- **Plan de Acción de Hidrógeno Verde 2023-2030:** Contempla medidas para fortalecer permisos, establecer regulaciones habilitantes, definir estándares de sustentabilidad, promover incentivos tributarios y fomentar desarrollo territorial y capacidades técnicas. Incluye acciones específicas para infraestructura portuaria y logística que permitan la integración del hidrógeno en la cadena de valor nacional.

Cabe destacar que el desarrollo regulatorio se realiza con un proceso participativo que involucra a múltiples ministerios, sector privado, academia y sociedad civil, buscando equilibrar la promoción industrial con la protección ambiental y social, aunque existen críticas sobre la necesidad de fortalecer la regulación ambiental y la consulta ciudadana en proyectos de hidrógeno. No obstante, aún falta una regulación específica para operaciones portuarias en Chile referente al hidrógeno y sus derivados, actualmente en desarrollo; por este motivo, las anteriores constituyen guías de relevancia.

Del mismo modo, es fundamental desarrollar criterios estandarizados, ya que, por ejemplo, el amoníaco es una sustancia peligrosa por su toxicidad, inflamabilidad y corrosividad, por lo que su almacenamiento, transporte y manejo están estrictamente regulados tanto a nivel nacional como internacional. Aunque existe una clasificación global unificada gracias al Sistema Globalmente Armonizado (GHS), cada país establece umbrales y normas específicas. Por ejemplo, en EE. UU. la OSHA regula su uso desde las 4,5 toneladas, mientras que, en el Reino Unido y Australia, los límites son de 50 y 200 toneladas, respectivamente.

6.2. Regulación y estándares portuarios para combustible

6.2.1. Amoníaco

Hasta 2015, el uso del amoníaco como combustible estaba prohibido por el Convenio SOLAS de la Organización Marítima Internacional (OMI). Sin embargo, con la incorporación del Código IGF, se abrió la puerta a su utilización bajo estrictas normas de seguridad para combustibles con bajo punto de inflamación. Actualmente, la OMI trabaja en directrices específicas para su uso seguro, con un borrador esperado para septiembre de 2024.

Entre las medidas propuestas para el transporte de este vector, se considera:

- Tuberías de doble pared obligatorias para buques no gaseros.
- En buques gaseros, esta exigencia aplicará solo fuera de las zonas de carga.
- Que los barcos que usen amoníaco alcancen el mismo nivel de seguridad que los que operan con gas natural.

6.2.2. Metanol

El uso del metanol también avanza con respaldo técnico. En 2020, Lloyd's Register y el Instituto del Metanol publicaron una guía para su abastecimiento y manejo seguro. A nivel europeo, se desarrollan normas voluntarias como el Acuerdo de Taller CEN y los estándares ES-TRIN 2021/1 para navegación interior. También se aplican normas de seguridad para atmósferas explosivas (BS EN 60079-10-1:2015) y directrices de la OMI (MSC.1/Circ.1621) para buques que usan metanol.

Aunque aún no existen normas ISO equivalentes al abastecimiento de GNL, el desarrollo de cadenas de suministro de metanol y otros combustibles alternativos requiere evaluaciones de riesgo detalladas.

6.3. Infraestructura requerida en los puertos para la transferencia de h2

El desarrollo del mercado global del hidrógeno verde está estrechamente ligado a la capacidad portuaria para integrar, almacenar y distribuir este combustible y sus derivados. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2023), los puertos juegan un papel fundamental en la construcción de una cadena de suministro sostenible y eficiente para el hidrógeno, especialmente cuando están próximos a fuentes renovables como parques eólicos y solares, lo que permite una producción integrada y de bajo impacto ambiental. En este sentido, el desarrollo del mercado del hidrógeno y sus derivados como combustible depende directamente de la capacidad de los puertos para adaptarse. Esto incluye:

- Instalaciones seguras de almacenamiento y abastecimiento.
- Normativas específicas para la manipulación de estos productos.
- Coordinación entre reguladores, operadores y empresas navieras.
- Definir el rol estratégico de los puertos en el desarrollo del mercado del hidrógeno verde.

La IEA proyecta que, en un escenario de emisiones netas cero, la inversión anual global en infraestructura para el transporte de hidrógeno alcanzará los 35 mil millones de dólares hacia finales de esta década, superando paulatinamente la inversión en gas natural. Para el transporte marítimo a largas distancias – más de 2.500 km–, los buques tanque especializados serán competitivos, pero requerirán que los puertos cuenten con instalaciones específicas, incluyendo plantas de licuefacción, regasificación y conversión. Actualmente, existen más de 100 plantas de licuefacción y 160 de

regasificación en puertos a nivel mundial, pero la demanda proyectada para 2030 implica triplicar esta infraestructura (IEA, 2023).

En consecuencia, Chile —y en particular el puerto de Quintero, en la Región de Valparaíso— se perfila como un nodo estratégico para el desarrollo del hidrógeno verde y sus derivados, como el amoníaco y el metanol. La infraestructura portuaria consolidada de Quintero, sumada a su cercanía a fuentes de energía renovable, lo posiciona como un punto clave tanto para la producción como para la futura exportación de estos vectores energéticos. Estudios recientes (H2LAC/GIZ, 2024) estiman que la modernización y ampliación de puertos como Quintero y Mejillones requerirá inversiones del orden de 80 a 100 millones de dólares, destinadas a adecuar sus instalaciones a los estándares de seguridad y eficiencia exigidos por esta nueva industria, incluyendo terminales especializados para el manejo de combustibles limpios.

Este desarrollo portuario se alinea con la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, que contempla una fase inicial (2020–2025) centrada en reactivar la industria local y dar los primeros pasos hacia la exportación, seguida de una etapa de expansión (2025–2030) enfocada en escalar la producción y consolidar corredores logísticos. El objetivo es posicionar a Chile como un proveedor global relevante de energéticos sostenibles hacia el año 2050. Se estima que la inversión acumulada necesaria para infraestructura logística y producción será del orden de US\$330 mil millones hasta 2050, acompañada de marcos regulatorios que faciliten la integración de estos corredores y aseguren la seguridad y eficiencia del transporte.

6.3.1. Caso de Éxito Internacional Para Replicar: La Inversión de CMB.TECH en Namibia para el Desarrollo de Hidrógeno Verde

CMB.TECH es una empresa belga especializada en tecnologías limpias y soluciones integrales para la producción y distribución de hidrógeno y amoníaco verde, con un enfoque particular en aplicaciones marítimas e industriales pesadas. Su apuesta por Namibia responde a la combinación única que ofrece este país africano: abundantes recursos renovables –principalmente solar y eólico–, disponibilidad de tierras, proximidad a la costa y un marco regulatorio en desarrollo que favorece la inversión en energías limpias. Esta conjunción convierte a Namibia en un lugar idóneo para el despliegue de proyectos de hidrógeno verde a gran escala.

En la región de Erongo, CMB.TECH, a través de su filial Cleanergy Solutions Namibia, ha establecido una planta piloto que integra un parque solar de 5,5 MW⁴ con un electrolizador de 5 MW para producir hidrógeno verde destinado a aplicaciones locales como camiones, locomotoras y equipos portuarios y mineros. Este proyecto incluye además una estación pública de recarga y un centro de formación para capacitar a la población local, enfatizando la transferencia tecnológica y el desarrollo social. La alianza estratégica con la empresa local Ohlthaver & List fortalece la integración comunitaria y asegura que el proyecto genere impactos económicos y sociales positivos para Namibia.

Paralelamente, el ambicioso proyecto Hyphen, con una inversión estimada en 10.000 millones de dólares y una superficie de aproximadamente 4.000 km², busca posicionar a Namibia como uno de los mayores productores mundiales de hidrógeno verde y amoníaco ecológico. Este desarollo

⁴ Unidad de medida utilizada para expresar la potencia máxima que puede generar un sistema, como un panel solar o un parque eólico, en condiciones ideales. No representa la potencia real que se produce en un momento dado, sino la capacidad máxima teórica que puede alcanzar.

verticalmente integrado combina energía eólica y solar para alimentar electrolizadores a escala gigavatio, con una producción proyectada de 350.000 toneladas anuales de hidrógeno y 2 millones de toneladas de amoníaco verde, contribuyendo a la reducción de cinco a seis millones de toneladas de CO₂ al año. El proyecto cuenta con reconocimiento internacional y apoyo gubernamental, y se destaca por su compromiso con una transición energética justa, que incluye la colaboración con comunidades locales y grupos ecologistas.

6.3.2. Aplicación del Modelo en Chile y Estrategias para Atraer Inversiones

Chile, con su vasta riqueza en recursos solares y eólicos, condiciones geográficas privilegiadas y puertos estratégicos como Quintero, tiene un potencial comparable para desarrollar proyectos similares de hidrógeno verde. Para atraer inversiones como las de CMB.TECH y Hyphen, es fundamental que Chile fortalezca un marco regulatorio claro, estable y coordinado que facilite los procesos de permisos y otorgue seguridad jurídica a los inversionistas.

Además, la creación de alianzas público-privadas que integren actores locales, promuevan la transferencia tecnológica y capaciten a la fuerza laboral es clave para asegurar un desarrollo sostenible e inclusivo. La experiencia namibiana demuestra que la participación de la comunidad y la generación de empleo local son factores determinantes para el éxito y la legitimidad social de estos proyectos, aspectos que Chile debe priorizar, especialmente en zonas con antecedentes industriales y sociales complejos como Quintero.

En infraestructura, Chile debe modernizar sus puertos y cadenas logísticas para el manejo seguro y eficiente de hidrógeno y sus derivados, desarrollando sistemas de almacenamiento, carga y transportes integrados con las plantas productoras. Mejorar la conectividad interna mediante gasoductos, ferrocarriles y carreteras es igualmente esencial para garantizar la competitividad y eficiencia del corredor de hidrógeno verde.

Finalmente, para posicionar a Chile como un destino atractivo para inversiones en hidrógeno verde, es necesario complementar los recursos naturales con incentivos económicos, programas de financiamiento específicos y una estrategia internacional de promoción que destaque el potencial renovable, la estabilidad política y la infraestructura estratégica del país.

En resumen, la inversión de CMB.TECH en Namibia no solo es un caso de éxito tecnológico y social, sino también un modelo integral que Chile puede adaptar y replicar. Con un enfoque que combine regulación eficiente, infraestructura moderna, capital humano capacitado y compromiso social, Chile tiene la oportunidad de convertirse en un referente global en la producción y exportación de hidrógeno verde, impulsando su transición energética y desarrollo sostenible.

Figura 6 - CMB.TECH en Namibia



Fuente: <https://cmb.tech/h2-infra/cleanenergy-solutions-namibia>, revisión 21/07/2025

6.3.3. Consideraciones sobre vectores energéticos y riesgos asociados

El hidrógeno líquido, amoníaco, metanol y los portadores líquidos de hidrógeno (LOHCs) son vectores con características técnicas y riesgos diferentes que impactan directamente en el diseño y operación portuaria.

Hidrógeno líquido (LH₂): Aunque es eficiente para el transporte, enfrenta una percepción pública sensible debido a accidentes históricos (como el desastre del dirigible Hindenburg en 1937). Su manejo requiere protocolos estrictos similares a los del gas natural licuado (GNL), dada su inflamabilidad y bajas temperaturas de almacenamiento (Chen et al., 2023).

Amoníaco: Su alta toxicidad y corrosividad demandan materiales y equipos específicos para evitar riesgos en almacenamiento y transporte. Sin embargo, puede reutilizar parte de la infraestructura existente en puertos, aunque la capacidad actual es insuficiente para la demanda proyectada (Chen et al., 2023).

Metanol: Presenta toxicidad para humanos por ingestión o inhalación, pero su impacto ambiental en caso de derrames es menor, ya que se dispersa rápidamente en el mar (Chen et al., 2023).

LOHCs (portadores líquidos de hidrógeno): Tienen menor toxicidad y riesgos que el amoníaco o metanol, con manejos de seguridad bien establecidos en puertos, aunque ciertos compuestos como el metilciclohexano (MCH) requieren atención especial por su inflamabilidad (Chen et al., 2023).

La coexistencia de múltiples vectores en un mismo puerto implica desafíos adicionales para la infraestructura y la gestión de riesgos, exigiendo diseños flexibles y protocolos integrados.

6.3.4. Adecuación de tipos de flota y requerimientos portuarios

Según el estudio realizado por GIZ (Del Vecchio y Farah, 2024), el amoníaco líquido puede ser transportado de forma segura utilizando buques tipo LPG (Gas Licuado de Petróleo), los cuales cuentan con capacidades que oscilan entre 60.000 m³ y 100.000 m³. Adicionalmente, es factible reconvertir buques de transporte de GNL (Gas Natural Licuado) para este fin o construir nuevas embarcaciones con especificaciones similares.

La infraestructura portuaria debe adaptarse a las características técnicas de los distintos tipos de naves, según los siguientes requerimientos:

Buques LPG: requieren puertos capaces de recibir embarcaciones con:

- DWT (tonelaje de peso muerto) superior a 43.000 toneladas
- Eslora (largo) mayor a 205 metros
- Calado (profundidad sumergida del casco) superior a 19,5 metros
- Buques LNG: requieren infraestructura que soporte:
- DWT superior a 40.000 toneladas
- Eslora mayor a 220 metros
- Calado superior a 21,1 metros

Buques tanque para metanol (tipo Aframax): el transporte de metanol, debido a su punto de ebullición de 64,7 °C, se realiza mediante buques tanque convencionales, como los Aframax, comúnmente utilizados para petróleo. Estos buques presentan:

- DWT superior a 115.000 toneladas
- Eslora mayor a 253 metros
- Calado superior a 24,2 metros

En base a estas especificaciones, se pueden establecer las siguientes observaciones para el contexto portuario chileno:

- Los buques LPG pueden ser operados en puertos como San Antonio y Quintero, que cumplen con los requisitos de calado menor a 19,5 metros, eslora mayor a 205 metros y DWT superior a 43.000 toneladas.
- Para los buques LNG, que demandan un calado mayor a 21,1 metros, eslora superior a 220 metros y DWT superior a 40.000 toneladas, San Antonio es actualmente el puerto mejor preparado en el país.
- En cuanto a los buques tanque tipo Aframax destinados al transporte de metanol, con requisitos de DWT mayor a 115.000 toneladas, eslora superior a 253 metros y calado mayor a 24,2 metros, San Antonio también se presenta como la opción más adecuada en Chile, dado su equipamiento para recibir grandes petroleros y naves de combustibles alternativos.

Es así, que se aprecia la necesidad de adaptar la infraestructura portuaria de Chile, así como la normativa, para responder a las necesidades de la creciente industria del hidrógeno verde, que se proyecta como un motor clave para la economía nacional y la descarbonización del transporte marítimo. El Plan de Acción Hidrógeno Verde 2023-2030 destaca la necesidad de fortalecer la infraestructura portuaria y promover la cooperación público-privada para generar economías de escala y evitar la dispersión de esfuerzos en múltiples puertos (Ministerio de Energía, 2024).

Asimismo, se requiere de inversión para adaptar sus terminales, garantizar la seguridad en el manejo del hidrógeno y derivados, y optimizar la logística de bunkering y carga para no afectar la operación portuaria tradicional. En regiones como Magallanes y Antofagasta, proyectos de hidrógeno verde también impulsan la modernización portuaria, con la construcción de nuevos terminales y la incorporación de tecnología para el manejo seguro de combustibles limpios, lo que evidencia la importancia nacional de contar con una infraestructura portuaria robusta y coordinada (Infraestructura Pública, 2024; H2LAC/GIZ, 2024).

7. BRECHAS DETECTADAS

Como parte fundamental del presente estudio, el 17 de diciembre de 2024 se realizó en Valparaíso una sesión participativa con actores clave del sector público y privado vinculados al desarrollo del hidrógeno verde en Chile. Esta instancia, que reunió a más de 30 representantes institucionales, se organizó bajo la metodología World Café, facilitando el diálogo abierto y colaborativo en torno a temas estratégicos mediante el trabajo en pequeños grupos.

En dicha instancia se abordó el posible proceso de transformación de Quintero en un hub de transferencia y exportación de hidrógeno verde y sus derivados, lo que representaría una oportunidad única para Chile en el contexto de la transición energética global. Sin embargo, el estudio realizado a través de talleres participativos y análisis multisectorial revela que este desafío requiere abordar brechas críticas en infraestructura, regulación, articulación logística, financiamiento, aceptación social y desarrollo de capital humano. La experiencia internacional demuestra que la superación de estos desafíos es posible mediante estrategias coordinadas, innovación y colaboración público-privada.

A continuación, se muestran los temas abordados en la mesa de trabajo.

7.1. Infraestructura Portuaria y Articulación Logística

El desarrollo de infraestructura portuaria especializada es el pilar fundamental para habilitar el corredor marítimo verde en Quintero. Si bien el puerto cuenta con ventajas competitivas por su ubicación y experiencia en manejo de cargas peligrosas, la infraestructura actual no está preparada para recibir, almacenar ni transferir hidrógeno y sus portadores (amoníaco, metanol, LOHC) a gran escala. El almacenamiento criogénico, los sistemas de carga presurizada, los brazos de transferencia especializados y los sistemas avanzados de monitoreo y emergencia son inversiones ineludibles. La experiencia del puerto de Rotterdam (Países Bajos) es ilustrativa: allí se han construido terminales dedicadas al hidrógeno y amoníaco verde, integradas con corredores logísticos ferroviarios y ductos que conectan la industria local y los centros de consumo europeos.

Esta integración temprana de la infraestructura portuaria con la demanda industrial y la planificación urbana ha permitido evitar cuellos de botella y maximizar la utilización de las instalaciones. En Quintero, replicar este enfoque requiere coordinar la expansión portuaria con la industria minera, química y de generación eléctrica, así como garantizar la coexistencia armónica con las operaciones tradicionales del puerto.

7.2. Brechas Normativas y Políticas Públicas

El estudio identificó la falta de un marco regulatorio específico y coherente como uno de los mayores obstáculos para la implementación de proyectos de hidrógeno verde en Chile. La dispersión de competencias entre ministerios, la ausencia de normativas técnicas para el manejo y transporte de hidrógeno y derivados, y la lentitud en la tramitación de permisos generan incertidumbre y retrasos. Casos como el de Japón y Australia muestran que la creación de marcos regulatorios claros, ventanillas únicas para permisos y estándares internacionales para la certificación de hidrógeno verde son factores clave para atraer inversiones y acelerar proyectos. En Japón, la colaboración entre el gobierno y la industria permitió definir estándares de seguridad y certificación que hoy son referencia global, mientras que en Australia, la Agencia de Energía Renovable (ARENA) ha

impulsado regulaciones y subsidios que han facilitado la construcción de hubs de exportación en Newcastle y Gladstone.

Para Quintero, avanzar hacia una ventanilla única y una regulación alineada con los estándares internacionales (como los de la OMI y la Declaración de Clydebank) es fundamental para reducir la burocracia, dar certeza a los inversores y garantizar la seguridad operacional.

7.3. Colaboración Interinstitucional y Aceptación Social

La transición hacia un corredor verde exige una colaboración estrecha entre actores públicos, privados y académicos. La creación de mesas permanentes de articulación, el intercambio de mejores prácticas y la participación temprana de la comunidad son esenciales para construir legitimidad y aceptación social, especialmente en una zona con antecedentes de conflictos ambientales como Quintero.

El puerto de Yokohama (Japón) es un ejemplo de éxito en este ámbito: su estrategia incluyó la formación de alianzas público-privadas, la capacitación de la fuerza laboral local y campañas de educación ciudadana que visibilizaron los beneficios económicos y ambientales del hidrógeno verde, logrando así la aceptación y el apoyo de la comunidad.

En Quintero, replicar estas estrategias implica fortalecer la formación técnica, desarrollar programas de sensibilización y garantizar que los beneficios del desarrollo se distribuyan equitativamente, generando empleo local y promoviendo la rehabilitación ambiental.

7.4. Financiamiento y Modelos de Negocio Sostenibles

El financiamiento de la infraestructura y la cadena de valor del hidrógeno verde es un desafío transversal. La experiencia internacional sugiere que los subsidios a la demanda (Japón), las rebajas tributarias (Colombia) y los esquemas de alianzas público-privadas (Unión Europea) son instrumentos eficaces para atraer inversión y reducir el riesgo de los proyectos en etapas iniciales.

En Chile, aún falta definir un modelo de negocio sostenible que asegure la rentabilidad a largo plazo. La articulación de incentivos económicos, la creación de fondos específicos y la promoción de alianzas estratégicas son pasos clave para movilizar capital y tecnología. Además, proyectar Valparaíso como una “región modelo” para la oferta y demanda de hidrógeno verde podría atraer inversiones y posicionar a la región como referente en innovación energética.

7.5. Innovación, Capital Humano y Observatorio Tecnológico

El desarrollo de la industria del hidrógeno verde requiere expandir capacidades locales en manufactura, ingeniería y operación de sistemas avanzados. La creación de un Centro de Desarrollo Tecnológico y un Observatorio Tecnológico permitiría a Chile monitorear tendencias globales, experimentar con aplicaciones comerciales y formar una fuerza laboral especializada, siguiendo el ejemplo de hubs tecnológicos en Alemania y los Países Bajos.

La integración de la industria del hidrógeno con sectores clave como la minería y la producción de acero y cobre verde potenciaría la demanda interna y fortalecería la cadena de valor nacional.

7.6. Recomendaciones Estratégicas

- Modernizar la infraestructura portuaria y logística de Quintero con estándares internacionales de seguridad y eficiencia.
- Establecer un marco regulatorio claro, coherente y alineado con los referentes globales, implementando una ventanilla única para permisos.
- Impulsar la colaboración interinstitucional, la formación de capital humano y la educación ciudadana para asegurar la aceptación social
- Enfatizar la descarbonización como justificación principal, alineando el proyecto con las metas globales de reducción de emisiones del transporte marítimo.
- Destacar el rol estratégico de Valparaíso como hub logístico portuario y su potencial para convertirse en nodo clave de almacenamiento y distribución de hidrógeno verde.
- Promover la colaboración multisectorial entre entidades públicas, privadas y académicas para garantizar un enfoque integral.
- Impulsar el desarrollo de regulaciones e infraestructura habilitante, atrayendo financiamiento nacional e internacional.
- Fomentar la innovación y el desarrollo tecnológico en electrólisis, almacenamiento, transporte y reconversión de hidrógeno.
- Resaltar el impacto regional y la formación de capacidades, generando empleo y fortaleciendo la economía local.
- Alinear el proyecto con iniciativas internacionales de corredores verdes, posicionando a Chile como líder en la exportación de hidrógeno verde y derivados.
- Evaluar la viabilidad financiera y la competitividad del proyecto, destacando las ventajas comparativas de Chile.
- Definir modelos de financiamiento y negocio sostenibles, adaptando incentivos internacionales al contexto chileno.
- Crear un Observatorio Tecnológico y un Centro de Desarrollo para fomentar la innovación y la transferencia tecnológica.
- Priorizar la sostenibilidad ambiental y la rehabilitación del territorio, integrando a la comunidad en la toma de decisiones.

8. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Chile se encuentra en una posición privilegiada para convertirse en un actor global relevante en la industria del hidrógeno verde, gracias a su abundancia de recursos renovables, especialmente solares y eólicos, que permiten una producción escalable y sostenible de esta energía limpia. La bahía de Quintero, por su ubicación estratégica y su infraestructura portuaria, tiene el potencial de transformarse en un hub clave para la exportación de hidrógeno y sus derivados, conformando así un corredor marítimo verde que aporte significativamente a la descarbonización nacional y global.

Entre las ventajas competitivas que sustentan esta visión destacan el sólido apoyo gubernamental, evidenciado en políticas públicas robustas y planes de acción como el Plan de Acción de Hidrógeno Verde 2023-2030, que establecen una hoja de ruta clara para el desarrollo de la industria en Chile. Además, la extensa red de acuerdos de libre comercio del país facilita la inserción competitiva de estos productos en mercados internacionales, mientras que proyectos en marcha, aunque inicialmente orientados al abastecimiento interno, sientan las bases para la futura exportación. La creciente demanda global de amoníaco verde y otros carriers derivados, impulsada por compromisos internacionales de descarbonización, abre una ventana de oportunidad que Chile puede aprovechar dada su capacidad para producir hidrógeno verde de manera competitiva y sostenible. Asimismo, el clima de inversión estable y favorable atrae capitales y tecnologías necesarias para consolidar esta industria emergente.

No obstante, la zona de Quintero enfrenta desafíos relevantes que deben ser abordados para materializar su potencial como exportador competitivo. La incertidumbre en la demanda global, condicionada por la velocidad y dirección de las políticas de transición energética en los países consumidores, introduce un riesgo que impacta la planificación y la inversión. En el ámbito portuario, la infraestructura actual requiere una modernización profunda para manejar de forma segura y eficiente los productos derivados del hidrógeno, incluyendo instalaciones especializadas para almacenamiento, carga y transferencia.

Esta necesidad se extiende a la cadena logística asociada, donde la conectividad mediante carreteras, ferrocarriles y gasoductos debe ser fortalecida para garantizar un transporte eficiente y de bajo costo desde las plantas de producción hasta el puerto.

El desarrollo de plantas de producción a gran escala implica inversiones significativas y la garantía de un suministro continuo de energía renovable, aspectos que requieren coordinación multisectorial y apoyo financiero. La alta inversión inicial y la competencia internacional, con países como Australia, Estados Unidos y naciones del Golfo Pérsico avanzando rápidamente en proyectos similares, exigen que Chile y Quintero implementen estrategias que mejoren la competitividad, incluyendo incentivos, subsidios y mecanismos de financiamiento específicos. Además, la regulación, aunque en proceso de avance, aún debe consolidarse con normativas claras y estandarizadas que faciliten la producción, almacenamiento y transporte, junto con sistemas de certificación que aseguren la sostenibilidad y calidad del hidrógeno verde exportado.

El contexto territorial y social añade complejidad al desarrollo del corredor verde en Quintero. La histórica contaminación industrial y los problemas ambientales asociados han generado desconfianza y resistencia en la comunidad local, lo que hace indispensable un compromiso serio con la reparación ambiental y la rehabilitación de áreas afectadas. La producción de hidrógeno verde, que demanda grandes cantidades de agua desalinizada, debe gestionarse con sensibilidad hacia las percepciones y necesidades de la población, evitando tensiones en una zona con desafíos hídricos.

La aceptación social será clave para el éxito del proyecto, y para ello se requiere transparencia, diálogo continuo y la distribución equitativa de beneficios, incluyendo la capacitación y generación de empleo local para evitar exclusión social.

En conclusión, el desarrollo de Quintero como un hub de transferencia de hidrógeno verde y sus derivados es una oportunidad estratégica alineada con los objetivos nacionales de descarbonización y desarrollo sostenible. Sin embargo, su concreción dependerá de la capacidad para superar brechas técnicas, económicas, regulatorias y sociales mediante una colaboración público-privada efectiva, una modernización integral de infraestructura, políticas públicas sólidas y una gestión ambiental y social responsable. El Plan de Acción de Hidrógeno Verde 2023-2030 ofrece un marco robusto para avanzar en estas líneas, estableciendo metas claras y acciones coordinadas que permitirán a Chile y a la región de Quintero posicionarse competitivamente en el mercado global del hidrógeno verde, contribuyendo a una transición energética justa y sostenible para el país y la región.

Por su parte, la experiencia internacional, con casos como Rotterdam, Yokohama o Newcastle, demuestra que la clave del éxito radica en la planificación estratégica, la colaboración público-privada, la innovación tecnológica y la integración de la comunidad local en cada etapa del proceso. Para Quintero, esto implica modernizar su infraestructura portuaria, desarrollar marcos normativos claros y eficientes, fortalecer la cadena logística y garantizar la sostenibilidad ambiental y social, especialmente en una zona marcada por un pasado industrial complejo.

El camino hacia un corredor marítimo verde en Quintero debe estar guiado por una visión integral y de largo plazo, que priorice la descarbonización, fomente la innovación y la formación de capacidades locales, y promueva la equidad en la distribución de beneficios. La alineación con iniciativas internacionales de corredores verdes y la búsqueda activa de financiamiento externo serán fundamentales para acelerar la implementación y consolidar la competitividad del proyecto.

9. REFERENCIAS

- Agency, I. E. (2022). Global Hydrogen review 2022.
- Agency, I. E. (2023). Global Hydrogen Review 2023.
- Alberto Del Vecchio, Gabriel Farah. (2024). Análisis de la Infraestructura Portuaria del Litoral Patagónico de Argentina para el Desarrollo de Proyectos de Hidrógeno Verde y Power-To-X (PTX)
- Amber Grid, Bulgartransgaz, Conexus, CREOS, DESFA, Elering, Enagás, Energinet, Eustream, FGSZ, FluxSwiss, Fluxys Belgium, Gas Connect Austria, Gasgrid Finland, Gassco, Gasunie, GASCADE, Gas Networks Ireland, GRTgaz, National Gas Transmission, NET4GAS, Nordio. (2023). European Hydrogen Backbone IMPLEMENTATION ROADMAP CROSS BORDER PROJECTS AND COSTS UPDATE.
- Bonnet-Cantalloube, B., Espitalier-Noël, M., Ferrari de Carvalho, P., Fonseca, J., & Pawelec, G. (2023). Clean ammonia in the future energy system. Hydrogen Europe. Disponible en
- Burga, B. (2023). Renewable Fuels. BloombergNEF.
- Cámara Marítima y Portuaria de Chile. (s.f.). Mapa portuario: Quintero.
- Caro, R. V. (2022). <https://exponav.org/blog/puertos-y-buques/el-hidrogeno-en-el-ambito-maritimo-posibilidades-del-buque-de-hidrogeno/>.
- Chile, B. C. (2022). Indicadores de Comercio exterior.
- Chile, G. d. (2024). Plan de Acción Hidrógeno Verde, 2023-2030.
- Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo (UNCTAD). (2023). Informe sobre el transporte marítimo 2023: Panorama general. Naciones Unidas. Disponible en unctad.org/rmt
- Connects, E. (2024). <https://www.energyconnects.com/news/utilities/2024/august/equinor-to-use-the-world-s-first-ammonia-powered-supply-vessel/>.
- Directemar. (2024). Boletín estadístico Marítimo datos 2023.
- DNV. (2023). Maritime Impact.
- DNV. (2024). Maritime Forecast to 2050: A deep dive into shipping's decarbonization journey.
- Empresa Portuaria Valparaíso. (2023). Plan Maestro Puerto Valparaíso 2023. Empresa Portuaria Valparaíso.
- Enaex. (2023). Memoria anual.
- Europe, H. (2023). Clean Ammonia in the Future Energy System.

Executive, T. M. (2022). <https://maritime-executive.com/article/two-methanol-fueled-feeder-ships-to-launch-north-sea-green-corridor>.

Fuster Justiniano, J., Arteaga Guaquín, Y., & Farías Hermosilla, R. (2022). Industria del amoníaco: estado actual y oportunidades para la descarbonización. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH y Ministerio de Energía de Chile.

FutureProofShipping. (2024). .

GIZ, Subiabre & Sánchez Ingenieros Asociados Limitada. (2024). Estudio de cuantificación de la capacidad de infraestructura portuaria chilena para proyectos de hidrógeno. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

Gobierno de España, Vicepresidencia Cuarta del Gobierno, Ministerio para la Transición ecológica y el reto demográfico. (2020). Hoja de ruta del hidrógeno: Una apuesta por el hidrógeno renovable.

Gobierno de España, Vicepresidencia Cuarta del Gobierno, Ministerio para la Transición ecológica y el reto demográfico. (2020). Hoja de ruta del hidrógeno: Una apuesta por el hidrógeno renovable.

Guzmán, M. J. (2021). El Puerto de Sevilla da nuevos pasos para impulsar la creación de un 'hub' de hidrógeno. Diario de Sevilla.

Hansen, S. Ø. (2023). <https://blog.ballard.com/marine/first-hydrogen-powered-vessels-marine>.

HESC, 2020. <https://www.hydrogenenergysupplychain.com/about-the-pilot/supply-chain/the-suiso-frontier/>, revisado 21/07/2025

HYSTOC, Fuel cells and hydrogen joint undertaking, European Commission. (2021). Hydrogen supply and transportation using liquid organic hydrogen carriers.

IEA. (2023). <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-projects-database#overview>.

Intelligence, M. (n.d.). <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/ammonia-market>.

IRENA and Methanol Institute. (2021). Renewable Methanol.

IRENA. (2022). Geopolitics of the Energy Transformation The Hydrogen Factor.

IRENA, I. R. (2022). Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: Part II – Technology review of hydrogen carriers.

Kontos, I. (2024). <https://container-news.com/maersk-deploys-largest-methanol-powered-ship-on-gothenburg-asia-route/>.

Lewis, M. (2024). <https://electrek.co/2024/05/22/us-first-hydrogen-fueled-vessel-officially-sets-sail/>.

Maluenda, B. (2023). Innovación y desarrollo tecnológico para la cadena de valor del hidrógeno verde en Chile.

- Maritime, B. (n.d.). <https://www.bairdmaritime.com/shipping/gas/vessel-review-phoenix-harmonia-large-lpg-ammonia-carrier-for-mol-gas-transport-arm>.
- Nations, U. (2023). HANDBOOK OF STATISTICS 2023.
- NEF, B. (2020). Hydrogen Economy Outlook, Key messages, March 30, 2020.
- News, S. (n.d.). <https://shipnerdnews.com/lng-fuelled-panamax-bulk-carrier-by-gsc-gets-green-light/>.
- Nora Wissner, Sean Healy, Dr. Martin Cames, Jürgen Sutter. (2023). Methanol as a marine fuel.
- Partnership, C. H. (2024, Agosto 26). <https://hyship.eu/>.
- Peggy Shu-Ling Chen , Hongjun Fan , Hossein Enshaei , Wei Zhang ,Wenming Shi , Nagi Abdussamie, Takashi Miwa, Zhuohua Qu, Zaili Yang. (2023). A review on ports' readiness to facilitate international hydrogen trade. El Sevier.
- Lloyd's Register. (2023). Fuel for Thought: Methanol.
- Lloyd's Register. (2023). Fuel for thought: Ammonia report.
- RMI (Rocky Mountain Institute) and Global Maritime Forum. (2022). Oceans of Opportunity: Supplying Green Methanol and Ammonia at Ports.
- SEIA. (2022). Criterio de evaluación en el SEIA: Introducción a proyectos de hidrógeno verde.
- SEIA. (2024).
https://seia.sea.gob.cl/archivos/2024/07/24/ce3_Capitulo_1_Descripcion_de_Proyecto_Rev.0.pdf.
- transport, G. n. (n.d.). <https://gasnam.es/project/hydromar/>.
- Vilela, A. (2023). <https://h2businessnews.com/el-hydrotug-1-entra-en-accion-el-primer-remolcador-del-mundo-propulsado-por-hidrogeno/>.
- YARA. (2023). <https://www.yara.com/corporate-releases/the-worlds-first-clean-ammonia-powered-container-ship/>.

10. ANEXOS

Regulación amoníaco

Tabla 4 - Normativa aplicable en Chile para el amoníaco

Área	Regulación	Entidades Reguladoras	Descripción
Almacenamiento de Amoníaco	Decreto 43	Ministerio de Salud (MINSAL)	Define los lineamientos para el almacenamiento de sustancias peligrosas, como el amoníaco líquido y en solución, regulando el tipo de instalación según las cantidades máximas de almacenamiento.
Gases envasados (Clase 2)	NCh382 (Artículo 76)	Ministerio de Salud (MINSAL)	Regula el almacenamiento de gases tóxicos en cilindros o contenedores, como el amoníaco, especificando los requisitos de las áreas de almacenamiento, sistemas de detección de fugas y equipos de protección.
Gases tóxicos a granel (Clase 2.3)	NCh382 (Artículo 158)	Ministerio de Salud (MINSAL)	Exige sistemas de detección de fugas, control de derrames y distancias de seguridad para tanques que almacenan gases tóxicos como el amoníaco.
Transporte Terrestre	Decreto 298	Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (MTT)	Regula el transporte terrestre de sustancias peligrosas, incluyendo requisitos para vehículos, señalización, antigüedad de camiones, y otras condiciones para el transporte seguro de amoníaco.
Almacenamiento en Puertos	Resolución 96	Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (MTT)	Regula las cargas peligrosas en recintos portuarios, clasificando el amoníaco como una carga de depósito condicionado y aplicando medidas específicas para su manipulación en puertos.
Normativa Marítima Internacional	Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas (IMDG)	Autoridad Marítima Nacional	Establece medidas internacionales para el transporte seguro de mercancías peligrosas, incluyendo gases tóxicos como el amoníaco, en áreas portuarias y marítimas.
Refrigeración con Amoníaco (R717)	Reglamento sobre Condiciones de Seguridad en	Ministerio de Salud (MINSAL)	Regula los requisitos de seguridad, detección de fugas y mantenimiento en sistemas de refrigeración que utilizan amoníaco como refrigerante.

Área	Regulación	Entidades Reguladoras	Descripción
	Sistemas de Refrigeración con Amoníaco		
Evaluación de Impacto Ambiental	Decreto 40 (Ministerio de Medio Ambiente)	Ministerio de Medio Ambiente (MMA)	Regula los proyectos que involucran la producción, disposición o transporte de sustancias peligrosas como el amoníaco, especificando que deben ser sometidos al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental cuando superen ciertos umbrales de cantidad o tiempo.
Terminales Marítimos	Decreto Supremo N° 1 de 1992 (Ministerio de Defensa Nacional)	Ministerio de Defensa Nacional	Regula los permisos para la instalación y operación de terminales marítimos que transporten sustancias peligrosas como el amoníaco, garantizando la seguridad de las operaciones y la protección de los ecosistemas acuáticos.

Regulación metanol

El metanol, al ser una sustancia peligrosa se regula principalmente bajo la normativa internacional que regula el transporte marítimo. Dentro de la principal regulación, podemos encontrar:

Tabla 5 - Regulación Metanol

Aspecto	Detalle
Reglamento de Seguridad para la Manipulación de Explosivos y Otras Mercaderías Peligrosas en los Recintos Portuarios (TM-029)	Este reglamento, aprobado por el Decreto Supremo N.º 618 del 23 de julio de 1970, establece las medidas de seguridad para la manipulación de mercancías peligrosas, incluyendo el metanol, en los recintos portuarios chilenos. Define procedimientos para la carga, descarga, almacenamiento y movilización de estas sustancias, con el objetivo de prevenir accidentes y mitigar riesgos asociados
Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas (Código IMDG)	Chile ha adoptado el Código IMDG, que proporciona directrices internacionales para el transporte seguro de mercancías peligrosas por vía marítima. Este código clasifica al metanol como una sustancia peligrosa y detalla los requisitos específicos para su embalaje, etiquetado, estiba y manipulación durante el transporte marítimo. .
Reglamento de Almacenamiento de Sustancias Peligrosas	Este reglamento establece las condiciones y medidas de seguridad para el almacenamiento de sustancias peligrosas, incluyendo el metanol, en instalaciones terrestres. Aunque se centra en instalaciones en tierra, sus disposiciones son relevantes para las áreas de almacenamiento dentro de los recintos portuarios. .

Aspecto	Detalle
Procedimientos de Seguridad para el Transporte Marítimo y Manipulación de Sustancias Específicas	<p>La Autoridad Marítima de Chile ha emitido circulares que establecen procedimientos de seguridad para el transporte marítimo y la manipulación de sustancias peligrosas específicas en los recintos portuarios. Aunque algunas de estas circulares se enfocan en sustancias como el nitrato de amonio, los principios y medidas de seguridad descritos pueden ser aplicables, en términos generales, a la manipulación de otras sustancias peligrosas como el metanol.</p> <p>DIRECTEMAR mediante la Ordenanza Marítima O-32/0110, ha establecido el Procedimiento de Control de Mercancías Peligrosas en Puertos (específico para el control de mercancías peligrosas en los puertos nacionales), indicando la documentación requerida, medidas de seguridad y protocolos que deben seguirse para el desembarque y manejo de sustancias como el metanol en recintos portuarios.</p>
Reglamento de Seguridad para las Instalaciones y Operaciones de Producción y Refinación, Transporte, Almacenamiento, Distribución y Abastecimiento de Combustibles Líquidos	<p>Decreto Supremo N° 160 del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción), establece los requisitos mínimos de seguridad que deben cumplir las instalaciones y operaciones relacionadas con combustibles líquidos, incluyendo el metanol.</p>
Normas Internacionales y Buenas Prácticas	<p>Además de las regulaciones nacionales, existen normas internacionales y guías de buenas prácticas que, aunque no son de cumplimiento obligatorio en Chile, pueden servir como referencia para la manipulación segura del metanol en entornos portuarios. Por ejemplo, la Asociación Internacional de Puertos y Muelles (IAPH) ha desarrollado listas de verificación de seguridad para el abastecimiento de metanol en puertos, las cuales pueden ser útiles para operadores portuarios chilenos.</p>