

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA DEPARTAMENTO DE
INDUSTRIAS**

**ANÁLISIS ESTRATÉGICO, TÉCNICO Y ECONÓMICO DE ALTERNATIVAS PARA
EL ALMACENAMIENTO Y LA DISTRIBUCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE EN
CHILE**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERIA CIVIL
INDUSTRIAL**

AUTOR

BÁRBARA CORNEJO

PROFESOR GUÍA

MARÍA PILAR GARATE

PROFESOR CORREFERENTE

RODRIGO MENA

SANTIAGO DE CHILE, 04 DE OCTUBRE DE 2024

Agradecimientos

En esta etapa que termina, quisiera agradecer a todas las personas que me han acompañado a lo largo de los años, estando conmigo cuando tuve éxito y cuando no. A quiénes tuvieron una paciencia infinita y quiénes lograron apoyarme a pesar de todas las caídas que tuve.

A mi madre, Jenny y a mi padre Ramón, por confiar en mí y haberme apoyado siempre independiente de las decisiones que tomara. Por haberse sacrificado para sacar a sus hijos adelante, incluso si eso significó mucho esfuerzo por parte de ustedes. Los amo, y cada uno de mis triunfos será suyo.

A mis hermanos, Javiera y Cristián, por darme tranquilidad cada vez que lo necesitaba, por traerme la paz que me faltaba con todo el estrés universitario. Por hacerme reír incluso en los peores momentos, y darme consejos cuando más lo necesitaba.

A Enrique, por ser mi apoyo fundamental y mi soporte en la universidad. Por darme apoyo siempre que la pasaba mal, por apoyarme incondicionalmente. Por cada momento que hiciste que estudiar fuera divertido, por cada momento en el que me apoyaste cuando estaba triste. Por confiar en mí incluso cuando yo no podía.

A mis tíos y abuelos, por siempre guiarme hacia el éxito, celebrar mis logros, y estar en mis fracasos.

A Sergio y Ramón, quiénes no me pueden acompañar físicamente, sin embargo, sé que ambos me están mirando desde el cielo con una sonrisa en su cara.

A mis amigos, que a pesar de todo el estrés que vivimos, me alegraban el día.

Finalmente, mi más sinceros agradecimientos a mi profesora guía, María Pilar, que su retroalimentación y apoyo en este proceso me apoyaron muchísimo.

Tabla de contenidos

Resumen Ejecutivo	5
Introducción	6
Objetivos	8
Objetivo General.....	8
Objetivos Específicos	8
Marco Teórico	9
Hidrógeno Verde	9
Demanda de Hidrógeno.....	10
Métodos de Almacenamiento.	13
<i>Hidrógeno Comprimido (CH₂).....</i>	<i>14</i>
<i>Hidrógeno Líquido (LH₂).....</i>	<i>15</i>
<i>Portadores Orgánicos Líquidos de Hidrógeno (LOHC).....</i>	<i>16</i>
<i>Amoniaco (NH₃)</i>	<i>17</i>
<i>Mezclar Hidrógeno en Gaseoductos Naturales</i>	<i>18</i>
<i>Perspectiva Técnica.....</i>	<i>18</i>
Métodos de Distribución.....	22
<i>Perspectiva Económica</i>	<i>24</i>
Panorama de Producción de Hidrógeno Verde en Chile	30
Metodología	32
Resultados.....	34
Análisis Comparativo de Hidrógeno Verde en Chile y Australia	34

<i>Australia</i>	36
<i>Chile</i>	54
<i>Tabla Resumen Chile y Australia</i>	66
<i>Mejores Prácticas de Distribución De Australia</i>	73
Selección y Clasificación de los Métodos de Almacenamiento y Distribución	76
Análisis del Mercado Global	79
<i>Potencial Demanda de Hidrógeno Verde a Nivel Mundial</i>	79
<i>Costos y Competitividad</i>	80
Flujo de Caja	89
<i>Supuestos</i>	89
<i>Ingresos</i>	90
<i>Activos</i>	91
<i>Depreciación de Activos</i>	93
<i>Costos Operacionales</i>	93
<i>Impuestos</i>	97
<i>Inversión</i>	98
<i>Resultados Flujo de Caja</i>	99
Conclusiones y Recomendaciones	102
Anexos	106
Referencias	110

Resumen Ejecutivo

El mercado del hidrógeno verde es una gran oportunidad para países con alto potencial de energías renovables, como Chile, que busca ser un exportador clave para 2025. Dado que la tecnología aún está en desarrollo, este estudio analiza cuál es la mejor opción estratégica, técnica y económica para exportar hidrógeno verde desde Chile.

El estudio utiliza análisis PESTA y FODA para comparar a Chile y Australia, países con similitudes en la industria del hidrógeno verde. Luego, examina las mejores prácticas australianas en la distribución de hidrógeno, destacando su enfoque en investigación y desarrollo y la implementación de proyectos piloto relevantes.

Además, se lleva a cabo un análisis técnico en base a criterios como la madurez tecnológica y la energía para conversión, con el fin de determinar la mejor opción para exportar hidrógeno verde desde Chile. Como resultado, se concluye que la forma más viable es mediante barco, almacenado como amoníaco verde líquido.

Finalmente, se analizó el mercado global del hidrógeno verde y las tecnologías de almacenamiento, para realizar un análisis económico. Este reveló que la exportación de amoníaco será rentable si el costo de producción es de $\$0,77 \frac{USD}{kg}$, especialmente para países como China y Estados Unidos, que se espera que sean los mayores demandantes en 2050

Elegir un método incorrecto de almacenamiento y distribución de hidrógeno verde puede generar pérdidas económicas y afectar la competitividad de Chile. Una estrategia bien informada, como usar amoníaco verde y transporte marítimo, podría posicionar al país como líder en exportación. Sin embargo, la rentabilidad depende de altos subsidios, lo que plantea desafíos económicos.

Introducción

La problemática de la contaminación ambiental, exacerbada por el aumento de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO₂) y el óxido nitroso (N₂O), constituye uno de los desafíos más apremiantes de la actualidad. Nunez señala que “Las emisiones de dióxido de carbono procedentes de la quema de carbón representan el 44 % del total mundial, y constituyen, por sí solas, la mayor fuente de aumento de la temperatura global por encima de los niveles preindustriales.” (2023).

La generación de energía eléctrica mediante la quema de combustibles fósiles, aunque es económica, contribuye significativamente a la contaminación ambiental, causando efectos perjudiciales como sequías y cambios en la temperatura global del planeta. Según la NASA Global Climate Change (s.f.), la temperatura global aumentó en 1° durante el año 2022.

Es importante destacar que, si persiste el actual uso de combustibles fósiles y se cumple la proyección de duplicación de la demanda de energía para 2050, será extremadamente difícil limitar el aumento de la temperatura global a 2°C, como advierte el informe sobre "El impacto ambiental de las energías no renovables: cambio climático y más" (Sostenibilidad para todos, s.f.).

En respuesta a esta problemática, se ha centrado la atención en la investigación de alternativas para la producción de energía renovable. Una de estas alternativas emergentes es el hidrógeno verde, producido a partir de agua dulce, un recurso renovable, y que no emite CO₂, sino solo vapor de agua. Sin embargo, es importante tener en cuenta que, al ser un portador de energía novedoso, aún existen lagunas en la investigación que aborden aspectos relacionados con su producción, almacenamiento, distribución y consumo final.

Según el artículo “El hidrógeno verde: una alternativa para reducir las emisiones y cuidar nuestro planeta”, además de considerar los beneficios del hidrógeno verde, es necesario analizar

sus desventajas, que incluyen costos más elevados, mayor consumo de energía en la producción y precauciones de seguridad debido a su naturaleza volátil e inflamable (Iberdrola, s.f.).

En cuanto a la distribución de este gas, Ma et al. indican que existen diversas modalidades, como el uso de gaseoductos preexistentes, hidrógeno licuado, amoníaco e hidrógeno comprimido. La elección del método de almacenamiento y transporte plantea desafíos relacionados con la rentabilidad, la eficiencia, el desarrollo tecnológico y el apoyo político (2023, p. 5).

En el contexto chileno, el Ministerio de Energía ha expresado su intención de exportar hidrógeno verde a gran escala a partir del año 2030 (2020, p. 18). Esto suscita la pregunta de ¿cómo se llevará a cabo la distribución para la exportación del gas? ¿Qué método de distribución resulta más conveniente en términos técnicos y económicos, tomando en consideración qué es lo que otros países similares a Chile están haciendo?

Ante esta problemática, es necesario investigar las alternativas de distribución existentes en la actualidad considerando aspectos técnicos y económicos, con el objetivo de proponer una estrategia de distribución óptima para Chile.

Es relevante destacar que los actores clave involucrados en la implementación de la solución propuesta serán, en primer lugar, los propietarios y trabajadores de las plantas de hidrógeno verde en Chile, quienes deberán incorporar procesos para preparar el hidrógeno para su transporte. Por otro lado, el Gobierno de Chile se verá afectado, ya que deberá modificar e incorporar regulaciones, y establecer políticas y medidas que fomenten un desarrollo efectivo de la exportación de hidrógeno.

Objetivos

Objetivo General

Analizar estratégica, técnica y económicamente alternativas de distribución de hidrógeno verde con el propósito de escoger cuál es más conveniente para la exportación de hidrógeno verde en Chile mediante un análisis comparativo con Australia, estudios de mercado y estudio con herramientas económicas.

Objetivos Específicos

Investigar acerca de los diferentes métodos de distribución y almacenamiento de hidrógeno verde que se emplean actualmente.

Realizar un estudio comparativo con Australia con el objetivo de investigar las prácticas adoptadas por este país en el campo del hidrógeno verde, y determinar las oportunidades y amenazas que enfrenta Chile en esta área.

Seleccionar criterios relevantes para la clasificación de métodos de distribución y almacenamiento de hidrógeno verde en Chile.

Clasificar un métodos de distribución y almacenamiento con mayor madurez y potencial en la industria chilena de acuerdo con los criterios ya estudiados.

Realizar un análisis de mercado del hidrógeno verde, con el fin de proporcionar una visión detallada del estado y las perspectivas de la industria.

Llevar a cabo un análisis económico de la exportación de hidrógeno verde en Chile, enfocándose en el método de almacenamiento y distribución seleccionado, para evaluar la rentabilidad de este.

Marco Teórico

Hidrógeno Verde

Para adentrarse en el mundo del hidrógeno verde, es fundamental comprender de qué se trata este concepto. Según Silva (2021, p.5), el hidrógeno destinado a la generación de energía se categoriza en diferentes colores, cada uno representando el grado de sostenibilidad de su producción. El hidrógeno azul se obtiene a partir del gas natural, el hidrógeno negro se deriva del petróleo y el carbón, mientras que el hidrógeno verde se produce mediante fuentes de energía renovable. Sorprendentemente, solo el 4% de la producción total de hidrógeno corresponde al tipo verde.

Es importante resaltar que el hidrógeno no se encuentra en estado puro en la naturaleza y debe extraerse de diversas moléculas. En el caso del hidrógeno verde se realiza la separación de la molécula de agua pura, sustancia presente en el 70% del planeta. Esta separación se obtiene mediante un proceso llamado electrólisis, el cual demanda una considerable cantidad de energía obtenida de fuentes renovables (Alcalde, 2023).

Según lo señalado por la Revista Técnica de Medio Ambiente, también conocida como RETEMA, la sostenibilidad en la producción de hidrógeno estaría comprometida si la materia prima utilizada (agua) enfrenta problemas de escasez o restricciones ambientales. Debido a esto, es que se piensa en fuentes alternativas de suministro de agua, tales como la desalinización de agua de mar o el tratamiento de aguas residuales. Se destaca la primera mencionada dado a que no añade demasiado costo al producto final (2022).

Una vez que se han tomado las decisiones pertinentes sobre el asunto anterior y se ha generado el hidrógeno verde, la interacción de este con el oxígeno da como resultado la generación de energía libre de dióxido de carbono (Giménez, 2019, p.25). Se ha reconocido que el hidrógeno

verde representa una vía prometedora hacia la producción de energía no contaminante. Además, uno de sus principales beneficios radica en su disponibilidad constante. A diferencia de fuentes de energía renovable como la eólica o la solar, que dependen del viento o la radiación solar respectivamente, el hidrógeno verde puede utilizarse tanto de día como de noche, independientemente de las condiciones climáticas.

Dadas estas ventajas, existen múltiples motivos para fomentar la producción de energía a partir del hidrógeno, una tendencia que se refleja en las actuales tendencias globales. (Raman et al., 2022, p.9244).

Demanda de Hidrógeno

El hidrógeno verde, generado a partir de fuentes renovables, emerge como una solución clave en la transición hacia una matriz energética más sostenible. Sin embargo, es crucial reconocer que la demanda actual de hidrógeno abarca diversas fuentes de producción, que no son necesariamente amigables con el medioambiente.

Además, es importante reconocer qué países poseen mayor demanda de hidrógeno actualmente, puesto que en un futuro serán cruciales para la exportación y venta de hidrógeno verde.

De acuerdo con la información proporcionada por la International Energy Agency (IEA) el hidrógeno, ya sea azul, negro o verde, encuentra sus usos más destacados en los sectores de refinería, industria química y la de acero. (2023a, p.21)

En la figura 1, se puede observar la distribución de la demanda de hidrógeno en diferentes países a nivel mundial:

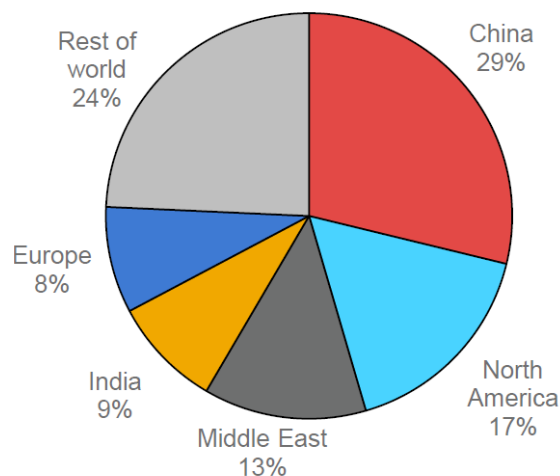


Figura 1: Consumo de hidrógeno a nivel mundial, 2022. Adaptado de Global Hydrogen Review 2023, IEA, 2023a.

La figura 1 resalta que China lidera el consumo total de hidrógeno con un 29%, seguido de América del Norte con un 17%, Medio Oriente con un consumo del 13%, mientras que India y Europa representan un 9% y 8% respectivamente. La categoría de “Otros” completa el resto del consumo. En esta última categoría, se encuentra el consumo de hidrógeno de América Latina, que es mayormente utilizado en la producción de amoníaco y en las refinerías, donde tan solo el 0,2% del hidrógeno se produjo en base a la electrólisis de agua (IEA, 2019, p.29).

Por otra parte, la distribución del consumo por países latinoamericanos se presenta en la figura 2:

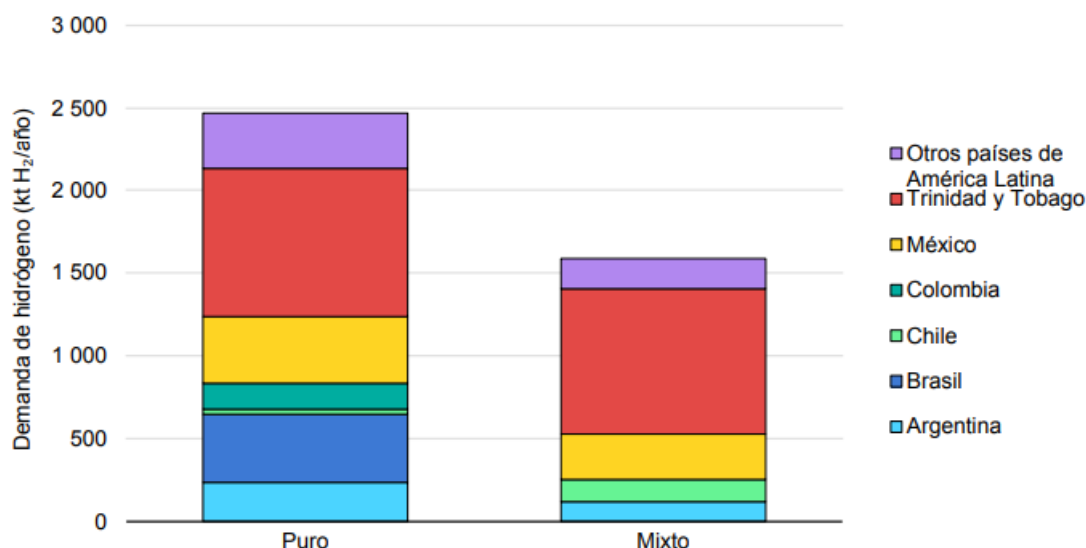


Figura 2: Consumo de hidrógeno puro y mixto por países de Latinoamérica, 2021. Adaptado de Hidrógeno en América Latina: de las oportunidades a corto plazo al despliegue a gran escala, IEA, 2021.

En referencia a la figura 2, es relevante destacar la distinción entre el hidrógeno puro y el hidrógeno mixto. El hidrógeno puro se define como aquel que se encuentra en su estado elemental, es decir, sin presencia de ningún otro contaminante en la mezcla. Este tipo de hidrógeno se emplea en procesos que requieren condiciones libres de contaminantes que pudieran interferir con el producto final.

Por otro lado, el hidrógeno mixto hace alusión a una combinación de hidrógeno con otros gases que contienen carbono, utilizado en procesos industriales específicos. Esta mezcla se emplea como combustible o materia prima en diversas aplicaciones industriales que requieren la presencia de carbono en la reacción. (IEA, 2021, p.24)

De la figura 2, se destaca Trinidad y Tobago con un consumo del 44% del total de hidrógeno, principalmente debido a la presencia de una industria química robusta en el país.

Además de ofrecer una visión detallada sobre la distribución del consumo de hidrógeno a nivel global y regional, es fundamental destacar las proyecciones futuras respecto a la demanda de

este recurso. Según un estudio reciente de la IEA (2021, p.36), se estima un aumento significativo en la demanda de hidrógeno para el año 2030. Esta tendencia ascendente se atribuye principalmente a las crecientes preocupaciones medioambientales y al enfoque de los países en el desarrollo de proyectos relacionados con el hidrógeno verde.

Métodos de Almacenamiento.

El hidrógeno verde, clave en la transición energética hacia la sostenibilidad, plantea desafíos no solo en su producción, sino también en su almacenamiento y distribución a gran escala.

Considerando la creciente demanda global, especialmente en sectores como la industria química y del acero, es fundamental abordar integralmente estos aspectos para asegurar una transición efectiva hacia un futuro energético más limpio y sustentable.

El hidrógeno destaca como el elemento más liviano y abundante en la naturaleza. Una de las características más relevantes es su alta densidad energética por unidad de masa, lo que implica que, a una masa constante, posee más energía que el petróleo, por ejemplo. No obstante, es importante señalar que el hidrógeno presenta una baja densidad volumétrica, lo que significa que, en un volumen determinado, contiene proporcionalmente menos energía en comparación al petróleo. Además, el hidrógeno no se encuentra en estado puro en la naturaleza, por lo que se considera un vector energético (Alvarez, 2021).

Por otro lado, el hidrógeno, al ser un gas, es altamente inflamable, incluso más inflamable que la gasolina. Además, es inodoro, incoloro e insípido, y se dispersa rápidamente, por lo que al haber una fuga de hidrógeno es complejo evitarla. Si esta fuga se prende, la llama que se produce es invisible, lo que hace difícil de detectar donde está el fuego para apagarlo (Crowcon, 2021).

Ante estos desafíos de seguridad, surge la necesidad de explorar alternativas de almacenamiento y distribución del hidrógeno verde. Existen variadas opciones para abordar este problema, como señala Sanhueza (2022), quien menciona las siguientes:

Hidrógeno Comprimido (CH₂)

Según la Asociación Chilena de Hidrógeno (s.f), esta es la forma más usual de almacenar hidrógeno, debido a que disminuye su volumen, y, en consecuencia, aumenta su densidad energética. Según Ma et al (2023, p.384) las presiones que se utilizan para comprimirlo van desde los 350 hasta los 700 [bar] aproximadamente. Además, se menciona que si bien, el almacenamiento del hidrógeno comprimido ofrece una variedad de beneficios, como la alta densidad de energía, posee problemas tales como la pérdida de energía debido al proceso inherente de compresión (dado a que este proceso requiere que energía ingrese al sistema, lo que aumenta la temperatura del gas haciendo que se pierda calor al entorno. Asimismo, cuando el hidrógeno comprimido se libera, también requiere un aporte de energía) que resulta en pérdidas de energía adicionales debido a la transferencia de calor hacia el entorno. La eficiencia general del almacenamiento de hidrógeno comprimido oscila entre el 70% y el 90%, por lo que se deben ahondar los esfuerzos para minimizar las pérdidas de energía y mejorar la eficiencia.

Según este texto, el hidrógeno comprimido puede ser almacenado en recipientes de almacenamiento o en almacenamiento geológico, que se mencionan a continuación:

Recipientes de Almacenamiento.

Almacenar hidrógeno comprimido en recipientes de almacenamiento es la tecnología más madura actualmente. Existen diversos tipos de recipientes, y se utilizan según la aplicación específica. En la actualidad la demanda de recipientes

de alta presión es baja, sin embargo, a medida que la demanda de hidrógeno siga creciendo, existe la posibilidad de que haya escasez de estos, por lo cual deben crecer los esfuerzos en investigación para generar técnicas de fabricación más eficientes y rentables.

Almacenamiento Geológico

Esta tecnología se refiere al almacenamiento del hidrógeno verde en formaciones geológicas, como cavernas de sal, acuíferos y campos de petróleo y gas agotados. La prevalencia de cavernas de sal es más notable en las regiones de América del Norte y Europa, con requisitos específicos que incluyen el grosor de las capas de sal y la composición química de estas estructuras. En el caso de los acuíferos, se debe tener en cuenta que su capacidad de almacenamiento está limitada tanto en cantidad como en caudal, lo que podría impactar en la viabilidad del almacenamiento. Además, se debe tener precaución con respecto a la estabilidad y seguridad de los acuíferos para garantizar un almacenamiento seguro. En cuanto a los campos de petróleo y gas agotados, se debe tener un cuidado particular, ya que su idoneidad para el almacenamiento a largo plazo de hidrógeno verde podría ser cuestionable debido al riesgo potencial de fuga a través de las formaciones rocosas.

Hidrógeno Líquido (LH2)

También conocido como hidrógeno criogénico, es otra forma de almacenar y luego transportar el hidrógeno. Según Ma et al (2023, p. 387) la licuefacción del hidrógeno consiste en enfriar el hidrógeno hasta los -253 [°C] aproximadamente, proceso que requiere

de mucha energía. Una vez líquido, se almacena el hidrógeno en tanques especializados para esto (Asociación Chilena del Hidrógeno, s.f).

Según Ma et al (2023, p.387 - 388) el hidrógeno líquido se considera más prometedor debido a que posee una gran densidad de energía gravimétrica, pero más baja densidad de energía volumétrica que la gasolina. Según Martínez (2023), la primera de estas implica que puede almacenar más energía por unidad de masa de combustible que la gasolina, mientras que la segunda implica que por unidad de volumen de combustible almacena menos energía que la gasolina.

Además, posee un gran desafío: el fenómeno de la ebullición. Cuando la temperatura alcanza el punto de ebullición del hidrógeno, el líquido comienza a evaporarse y convertirse en gas, lo cual puede provocar pérdida de combustible, y reducción de presión y temperatura del sistema, por lo que actualmente se está investigando y desarrollando tecnologías para minimizar las pérdidas.

Finalmente, algo que se debe tomar en consideración es la seguridad del almacenamiento del hidrógeno verde, pues es una sustancia altamente inflamable, por lo que ya existen variadas medidas de precaución para garantizar el almacenamiento y manipulación seguro de este, como el diseño de múltiples capas de almacenamiento del hidrógeno líquido para evitar la transferencia de calor y el riesgo de ignición, las válvulas de seguridad y sistemas de alivio de presión, creación de protocolos y directrices de seguridad, entre otros.

Portadores Orgánicos Líquidos de Hidrógeno (LOHC)

Mejor conocidos como portadores de hidrógeno, son moléculas que almacenan el hidrógeno en estado líquido y presentan propiedades similares a la de los líquidos en base

de petróleo crudo, por lo que deben manipularse similar a este. Una vez que es transportado, se procede a liberar el hidrógeno para utilizarlo, mediante un proceso llamado deshidrogenación (Niermann, 2019). Un ejemplo de LOHC es el tolueno (MCH) (Asociación de hidrógeno de Chile, s.f)

Amoniaco (NH₃)

Tal como el hidrógeno, el amoniaco necesita ser licuado para transporte de largas distancias. Sin embargo, hay más hidrógeno en un litro de amoniaco líquido (NH₃) que en un litro de hidrógeno líquido (LH₂). Además, el amoniaco líquido presenta una densidad hasta 10 veces más grande que el hidrógeno líquido. Una vez que el amoniaco es transportado, este puede ser reconvertido a hidrógeno mediante el proceso de *cracking* (The Oxford institute for energy studies, 2022).

Según Ma et al (2023, p.390) para producir amoniaco, se realiza la síntesis del amoniaco, que proviene de la reacción entre el hidrógeno verde y nitrógeno proveniente de la atmósfera. La síntesis del amoniaco requiere importantes aportes de energía, por lo que aún se están estudiando tecnologías que permitan hacer este proceso de manera más eficiente.

Por otro lado, se mencionan los peligros del amoniaco, pues este es un gas incoloro con olor acre que puede causar irritación respiratoria y daños a los ojos y a la piel, e incluso, si la exposición es a altas concentraciones de NH₃, podría ser mortal, por lo que existen diferentes respuestas a emergencias que se puedan ocasionar en el transporte. Sin embargo, se deberán seguir reforzando medidas para aumentar la seguridad en el transporte de este. Por otro lado, Ma et al (2023, p.388) menciona una forma de almacenamiento y distribución adicional:

Mezclar Hidrógeno en Gaseoductos Naturales

Esta forma de almacenamiento hace referencia a inyectar hidrógeno verde (como mezcla parcial del gas natural o como conversión completa del hidrógeno) a través de las redes de gas natural existentes. Este método posee bastantes ventajas, dado que es una forma rentable de transportar el hidrógeno, aprovechando la infraestructura ya construida. Además, contribuye a descarbonizar de manera más rápida la cadena de suministro del gas natural, acelerando la transición hacia un sistema energético bajo en carbono. Sin embargo, utilizar la mezcla como combustible plantea desafíos debido a las diferencias significativas en las propiedades físico-químicas entre el gas natural y el hidrógeno. Se ha investigado que las tuberías existentes pueden enfrentar un mayor riesgo de falla cuando transportan hidrógeno, debido a la fragilización por hidrógeno. Según CELO (s.f), la fragilización por hidrógeno es una pérdida permanente de ductilidad de un metal por la absorción de átomos de hidrógeno en la estructura metálica, lo que, combinado con un esfuerzo, puede ocasionar su ruptura.

Para abordar los desafíos anteriormente mencionados para cada método de almacenamiento de manera efectiva, es crucial evaluar y desarrollar diversos métodos de almacenamiento que permitan manejar el hidrógeno verde de forma segura y eficiente, garantizando así su viabilidad como una fuente energética clave.

Perspectiva Técnica

En el contexto del hidrógeno verde, los métodos de almacenamiento juegan un papel crucial en su viabilidad y eficiencia. Entre las características más relevantes de estos métodos se encuentran los riesgos asociados, la energía requerida para su conversión y reconversión, así como el grado de madurez tecnológica de los procesos involucrados. La madurez tecnológica de estos

procesos abarca varios aspectos críticos, tales como la madurez de los tanques de almacenamiento, los métodos de transporte y la integración de estos métodos en la cadena de valor del hidrógeno verde. Evaluar estos factores es esencial para comprender la viabilidad y eficiencia de cada método de almacenamiento en el contexto de una economía basada en el hidrógeno. La IEA (2019, p.75-76) realiza un análisis de estos factores para los métodos más comunes y renombrados: el hidrógeno líquido, el amoníaco y los portadores orgánicos líquidos de hidrógeno (LOHC). Esto se puede observar en la tabla 1 y 2:

Tabla 1: Madurez del proceso y la tecnología de métodos de almacenamiento

		Hidrógeno líquido	Amoníaco	LOHC (MHC)
Madurez del proceso y la tecnología	Conversión	Baja escala: Alta Gran escala: Baja	Alta	Media
	Almacenamiento en tanques	Alta	Alta	Alta
	Transporte	Barco: Baja Tubería: Alta Camión: Alta	Barco: Alta Tubería: Alta Camión: Alta	Barco: Alta Tubería: Alta Camión: Alta
	Reconversión	Alta	Media	Media
	Integración en cadena de valor	Media/Alta	Alta	Media

Fuente: International Energy Agency, (2019), The Future Of Hydrogen.

Tabla 2: Comparación de características técnicas en almacenamiento de hidrógeno

Características	Hidrógeno Líquido	Amoniaco	LOHC (MHC)
Peligros	Inflamable; sin olor ni visibilidad de llama.	Inflamable; toxicidad aguda; precursor de la contaminación del aire; corrosivo.	Tolueno: inflamable; toxicidad moderada. Otros LOHC pueden ser más seguros.
Energía requerida para conversión y reconversión	Actual: 25–35% Potencial: 18%	Conversión: 7–18% Reconversión: <20%	Actual: 35–40% Potencial: 25%
Mejoras Tecnológicas y Requisitos de Escalado	Eficiencia de la planta de producción; gestión de evaporación	Integración con electrolizadores flexibles; mejora de la eficiencia de conversión; purificación de H ₂	Utilización del calor de conversión; eficiencia de reconversión.

Fuente: International Energy Agency, (2019), The Future Of Hydrogen.

De la tabla 1, se puede analizar que la madurez del proceso de conversión del hidrógeno líquido depende de la escala de producción: es alta a baja escala y media a gran escala. La madurez de la reconversión del hidrógeno líquido a hidrógeno verde es alta, lo cual es beneficioso para el usuario final. Este método también presenta una gran madurez tecnológica para el almacenamiento en tanques y una integración de media a alta en la cadena de valor. Además, muestra una gran madurez en los métodos de transporte por tubería y camión, aunque la madurez es baja para el transporte por barco.

En la tabla 2, se observa que los riesgos asociados al hidrógeno líquido son altos. Además, el proceso de conversión y reconversión requiere entre un 25% y un 35% de la energía, expresado como un porcentaje del poder calorífico inferior del hidrógeno. Esto significa que se necesita entre el 25% y el 35% de la energía que se libera al quemar completamente 1 kg de hidrógeno como combustible (Prieto, s.f.). Además, posee una potencial conversión y reconversión de 18%, mucho más baja que la actual.

Finalmente, para que este método de almacenamiento sea el más eficiente, es necesario mejorar la eficiencia de las plantas de producción y la gestión de la evaporación del hidrógeno.

Si se realiza este mismo análisis con el método de almacenamiento de amoníaco, se tiene que la madurez de conversión de hidrógeno verde a amoníaco es alta, mientras que la reconversión de amoníaco a hidrógeno verde es media. La madurez del proceso de integración a la cadena de valor de este método, además del almacenamiento en tanques y el transporte en tuberías, cañerías y barco es alta, lo cual es de gran ventaja para el proceso.

Por otro lado, posee incluso más peligros que el hidrógeno líquido, una conversión que requiere entre un 7% y un 18% de energía como porcentaje del poder calorífico inferior, mientras que la reconversión requiere menos de un 20% de energía como porcentaje del poder calorífico inferior. Por último, para que este método sea el más eficiente, se necesitan mejoras en la integración con electrolizadores flexibles, mejora de la eficiencia de conversión y mejor purificación del hidrógeno.

Finalmente, para analizar el método de almacenamiento de LOHC, se utiliza como ejemplo el metilciclohexano (MHC), el cual es una opción más económica, y utiliza el tolueno como molécula portadora. En la tabla 1 se puede observar que posee una madurez tecnológica para la conversión

y reconversión media, además de una integración en la cadena de valor media, mientras que la madurez de almacenamiento en tanques y de cada método de transporte es alta.

Además, los peligros dependen del LOHC que se analiza, en el caso del tolueno, es inflamable y de toxicidad moderada. Posee una energía requerida de conversión y reconversión de entre el 35% y el 40%, con una potencial del 25%, más alto que el hidrógeno líquido. Para mejorar la eficiencia de este proceso, se necesita mejorar la utilización del calor de conversión y mejorar la eficiencia de reconversión.

Métodos de Distribución

El almacenamiento eficaz del hidrógeno es solo una parte del desafío; su transporte seguro y eficiente es igualmente crucial para su utilización a gran escala. La capacidad de mover hidrógeno de manera fiable desde los sitios de producción hasta los puntos de consumo final es esencial para asegurar su papel en la transición energética. La infraestructura de transporte debe manejar grandes volúmenes de hidrógeno y minimizar los riesgos de seguridad durante el proceso. Además, los métodos de transporte deben ser económicamente viables para que el hidrógeno pueda competir con otros combustibles y energéticos en el mercado. Dado que el hidrógeno tiene propiedades físicas y químicas distintas a otros combustibles, como su baja densidad volumétrica y alta inflamabilidad, el diseño de sistemas de transporte especializados es una necesidad

Según Bruce et al. (2018, p.32), la mejor forma de emparejar forma de almacenamiento y método de transporte de hidrógeno se puede ver en la tabla 3:

Tabla 3: Emparejamiento de almacenamiento y medio de transporte de hidrógeno según distancias indicativas

Vehículo	Tipo de almacenamiento	Distancias indicativas
Camión	CH ₂ , LH ₂ y NH ₃	<1000 [km]
Carril	CH ₂ , LH ₂ y NH ₃	>800 – 1100 [km]
Tubería	CH ₂	1000 – 4000 [km]
Barco	LH ₂ y NH ₃	>4000 [km]

Fuente: Bruce et al, (2018), National Hydrogen Roadmap.

Según la IRENA (2022a, p.35), la selección óptima del método de transporte y almacenamiento está condicionada por el volumen (en millones de toneladas de hidrógeno por año) y la distancia (en kilómetros) que se necesite recorrer. Esta relación se detalla en la figura 3:

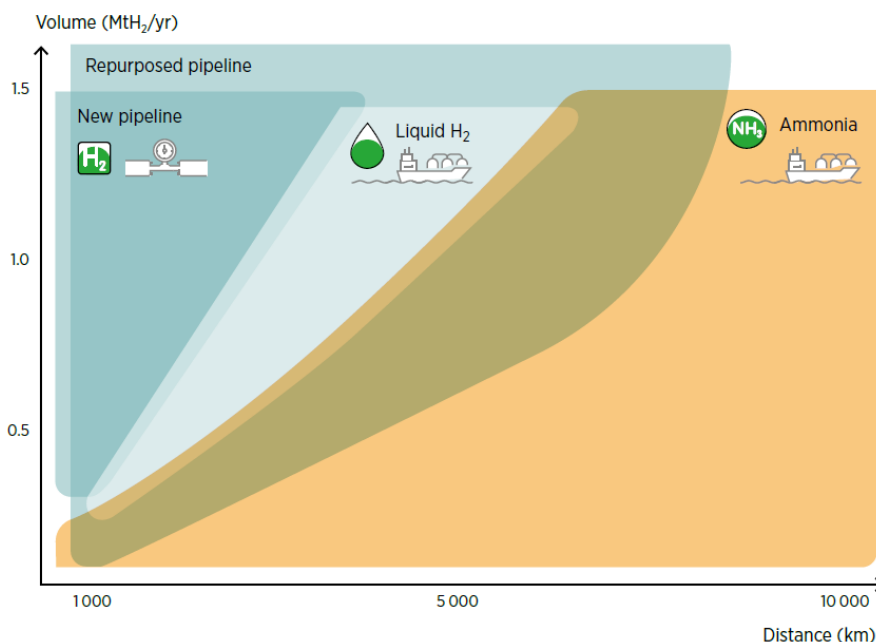


Figura 3: Costos eficientes por método de transporte y volumen a transportar. Adaptado de Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor, International Energy Agency, IRENA, 2022a.

En la figura 3 se pueden analizar los medios de transporte y almacenamiento compatibles para grandes distancias. En este caso, se descarta el uso de gasoductos para el transporte en Chile, ya que son escasos y adecuados solo para distancias cortas, tal como se muestra en la figura. Para distancias más largas, y de acuerdo con la clasificación presentada en la tabla 3, el método de transporte más eficiente es por barco, ya sea en forma de hidrógeno líquido o amoníaco.

Perspectiva Económica

Bruce et al (2018, p.32) además menciona los costos de cada método de transporte por tonelada-kilómetro de hidrógeno líquido, comprimido y amoníaco. La tabla 4 muestra estos costos.

Tabla 4: Costos de transporte

Método	Hidrógeno comprimido $\left(\frac{\$}{tkmH_2}\right)$ 430 bar	Hidrógeno Líquido $\left(\frac{\$}{tkmH_2}\right)$	Amoniaco $\left(\frac{\$}{tkmH_2}\right)$
Camión	2,33	0,92	0,33
Carril	0,55	0,28	0,04
Barco	0,52	0,09	0,03

Fuente: Bruce et al, (2018), National Hydrogen Roadmap.

En adición, Bruce et al (2018, p.32) menciona los costos asociados al transporte por tuberías. No obstante, dado que en este estudio se está evaluando la exportación de hidrógeno y, según la SEC (2017), Chile solo cuenta con gasoductos internacionales con Argentina, además de otros a nivel nacional, no resulta relevante considerar estos costos para los fines de este informe.

Potenciales Productores de Hidrógeno Verde

El hidrógeno verde emerge como una tecnología innovadora con una demanda potencial considerable, destacando por su naturaleza amigable con el medio ambiente. Esta cualidad ha desatado una competencia entre varios países por liderar su producción, a pesar de que aún se trata de una tecnología relativamente desconocida.

Según Nuevo (2022), los países que lideran en el desarrollo de políticas, tecnología y facilidades de exportación relacionadas con el hidrógeno son los siguientes:

1. China: Como se mencionó previamente, China es el mayor consumidor de hidrógeno, aunque su producción se centra principalmente en hidrógeno gris. En los

últimos dos años, China ha impulsado el desarrollo de más de 30 proyectos relacionados con hidrógeno verde.

2. Estados Unidos: También figura entre los principales consumidores de hidrógeno y destinó un presupuesto de 9.500 millones de dólares en 2021 para fomentar el desarrollo del hidrógeno verde.

3. La Unión Europea: Su enfoque se centra en el hidrógeno verde, y se ha fijado el objetivo de instalar 40 GW de electrolizadores de hidrógeno para 2030.

4. Finlandia, Suecia y Dinamarca: Estos países albergan casi 40 proyectos de hidrógeno verde y contribuyen con el 18% de los electrolizadores de Europa para la producción de hidrógeno verde. Se prevé que la capacidad alcance los 74 GW para 2030.

5. India: Está considerando la posibilidad de utilizar una cantidad mínima de hidrógeno verde en las refinerías de petróleo y en las plantas de fertilizantes.

6. Japón: Tiene la ambición de convertirse en la primera sociedad del hidrógeno del mundo. Dado que Japón carece de los recursos necesarios para generar energía eólica o solar en cantidades suficientes, está buscando acuerdos para importar hidrógeno de otros países.

En general, la tendencia global indica que los países están apostando por la producción de hidrógeno verde debido a la creciente preocupación por el medio ambiente y a su versatilidad en la industria, ya que no depende de factores como la disponibilidad de energía solar o eólica.

Según la Agencia Internacional de Energías Renovables (2022, p.46), para analizar los potenciales exportadores de hidrógeno verde, se puede comparar la producción

potencial, con su demanda esperada y los costos para el año 2050. Países que pueden aprovechar su mercado de energía renovable, atrayendo inversiones para la producción de hidrógeno verde, serán potenciales exportadores, pues el costo de producción es más bajo. En este grupo se encuentran países como Australia, Chile, Marruecos y España.

Según Smink (2021) los 6 países con mayores proyectos en hidrógeno verde son Australia, Países Bajos, Alemania, China, Arabia Saudita y Chile, destacando al primero de estos como “la Arabia Saudita del hidrógeno verde” pues este país planea construir el proyecto más grande de hidrógeno verde del mundo, con electrolizadores de capacidad total de 14 GW.

Según el sitio Rystad Energy (2023) los 10 países con mayor producción de hidrógeno verde (con capacidad acumulada), se pueden ver a continuación:

Tabla 5: Top 10 países con mayor producción de Hidrógeno verde (capacidad acumulada) por miles de toneladas.

Año	Australia	Estados unidos	España	Canadá	Chile	Egipto	Alemania	India	Brasil	Marruecos
2023	0,6	47,3	1,7	14,7	2,6	0	27,1	2,1	0	0
2024	3,1	127,2	38,2	101,7	32,5	0	91,7	30,8	10	0
2025	98,8	410,8	228,1	212,1	59,4	74,2	231,2	231,4	136,8	31
2026	139,8	528	489	484,4	364,9	412,8	381,7	502,7	255,4	31,1
2027	533,2	1354	747,2	1484,4	629,9	446	415,3	957,1	601	384,9
2028	1348,6	1354	1294,4	1484,4	1160,4	885,7	582,9	1099,6	601	984,9
2029	1503,6	1785,8	1314,6	1552,2	1201,7	973,6	759,3	1118,2	851	984,9
2030	2051,2	2041,4	1981,7	1552,2	1455	1449,9	1258,7	1118,2	1057,2	984,9

Fuente: Rystad Energy, (2023), Green hydrogen: technology breakthroughs mean iridium shortage and high prices will ease in 2023.

En esta tabla se puede ver que los tres primeros países que más producirán hidrógeno verde en el año 2030 serán Australia, Estados Unidos y España, seguidos por Chile y Canadá.

Además de la capacidad de producir, también es importante analizar la capacidad de hacer tratados con otros países para exportar el hidrógeno. Según la IRENA (2022, p.77), estos son los países que poseen tratados anunciados públicamente hasta noviembre del año 2021:

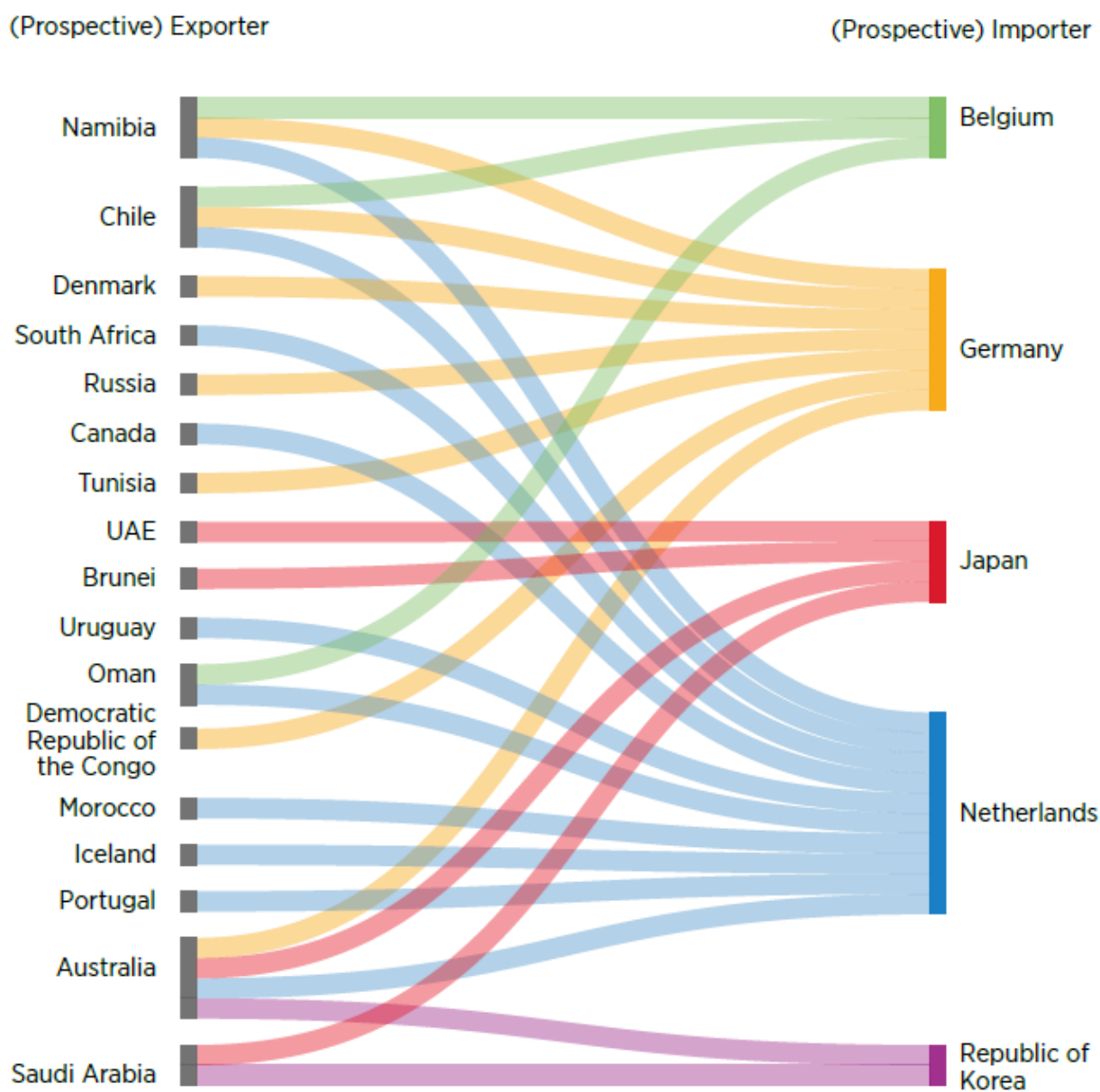


Figura 4: Acuerdos comerciales bilaterales y Memorandos de Entendimiento (MOUs) seleccionados entre países, anunciados hasta noviembre de 2021. Adaptado de Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor, IRENA, 2022

Según esta figura, Australia destaca como el principal productor de hidrógeno verde y también cuenta con el mayor número de tratados de exportación hasta el año 2021, lo que sugiere su ascenso como una potencia mundial en este portador de energía.

Por otro lado, Chile no se queda atrás en cuanto a tratados de exportación, lo que apunta a un panorama prometedor para su papel en la economía global del hidrógeno verde. Con estos datos, queda claro que tanto Australia como Chile están bien posicionados para liderar el camino hacia un futuro impulsado por energías limpias y sostenibles.

Panorama de Producción de Hidrógeno Verde en Chile

En América Latina, los países que más están invirtiendo en la producción de hidrógeno verde no solo son aquellos con abundantes recursos naturales, sino también aquellos que cuentan con un entorno de políticas y perfil de riesgo favorable (Bnamericas, 2022). Según esta fuente, Chile lidera el camino en la región en términos de hidrógeno verde. Esta afirmación se basa en el análisis de políticas gubernamentales, incentivos, el número de proyectos en desarrollo o funcionamiento, así como el nivel de adopción del transporte impulsado por hidrógeno, entre otros factores. Chile actualmente tiene 25 proyectos en desarrollo, en los que destaca una planta generadora en Magallanes, que proporcionará una capacidad de 10 MW. Colombia, Brasil, Uruguay y Argentina le siguen en el desarrollo del hidrógeno verde.

Según la IEA (2019, p.10), "Chile tiene la ambición de producir y exportar el hidrógeno más competitivo del mundo a partir de electricidad renovable para el año 2030". Esta afirmación se sustenta en el considerable potencial energético renovable del país. Según el Ministerio de Energía (2020, p.10), Chile cuenta con más de 1.800 GW de potencial energético renovable, lo que equivale a 70 veces la demanda nacional. Este

potencial es particularmente notable en el norte de Chile, donde se encuentra la radiación solar más alta del planeta, y en el extremo austral, donde los vientos soplan con una fuerza comparable a la de los vientos marinos.

En este contexto, Agosin y Bitran (2022) mencionan que Chile posee las mejores condiciones para la producción de hidrógeno verde en el Desierto de Atacama y en Magallanes, regiones que destacan por sus excepcionales recursos naturales.

Según estos autores, en la actualidad los principales competidores de Chile en el mercado de la exportación de Hidrógeno son los países del Golfo Pérsico, los del Norte de África y Australia, sin embargo, Chile posee mejores condiciones naturales que dichos países, y el diferencial de costo de transporte no es significativo.

Debido a esto, si se suman los esfuerzos públicos y privados, en conjunto con las oportunidades naturales de Chile, este posee grandes oportunidades para ser de los principales productores y exportadores del mercado.

Metodología

Esta sección está dedicada a presentar las herramientas metodológicas empleadas para alcanzar la conclusión central de este estudio: determinar el método óptimo para el almacenamiento y la distribución de hidrógeno verde en Chile. Para lograr este objetivo, se llevará a cabo un análisis completo que incluirá los siguientes aspectos:

En primer lugar, se realizará un análisis comparativo entre Chile y Australia, con el objetivo de evaluar el progreso relativo de Chile en comparación con Australia. Se justificará la elección de Australia como punto de referencia y se aplicarán herramientas analíticas como el análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas) y el análisis PESTA (Político, Económico, Social, Tecnológico y Ambiental) para realizar un análisis competitivo entre Chile y Australia.

Además, se realizará una tabla comparativa con los resultados obtenidos en el análisis anterior, y se llevará a cabo una revisión de las mejores prácticas de distribución de hidrógeno verde implementadas por Australia.

A través de este análisis comparativo y detallado, se espera obtener una comprensión profunda de las estrategias y enfoques de la industria de hidrógeno verde adoptados por Chile y Australia, lo que será útil para la posterior selección del método más adecuado para el contexto chileno.

En segundo lugar, se llevará a cabo la selección y clasificación de los métodos de distribución más apropiados para el país. Este proceso se basará en un análisis cualitativo que evaluará la distancia de traslado, el grado de madurez tecnológica y los riesgos y aspectos de seguridad asociados con cada método. Basándose en esta información detallada, se tomará la decisión sobre qué método será objeto de un estudio más profundo en este análisis.

En tercer lugar, se llevará a cabo un análisis del mercado global del hidrógeno verde con el fin de determinar la viabilidad de la distribución desde Chile hacia mercados internacionales. Este análisis comprenderá varios aspectos clave. Donde primero, se evaluará el potencial de demanda de hidrógeno verde a nivel mundial. Luego, se analizarán las tendencias actuales y futuras de esta demanda. Se examinará también el comportamiento del mercado en términos de precios y competitividad, así como los mercados objetivo más prometedores para la exportación de hidrógeno verde en Chile. Por último, se llevará a cabo una revisión de las tecnologías relacionadas a la distribución de amoniaco verde a nivel mundial. Este análisis del mercado global del hidrógeno verde proporcionará información crucial para tomar decisiones informadas sobre la estrategia de distribución internacional desde Chile.

Finalmente, se llevará a cabo un análisis económico exhaustivo que abarcará la elaboración de un flujo de caja estimado. Este flujo de caja contemplará estimaciones de los ingresos esperados, considerando factores como el precio de venta del amoniaco verde y la oferta de una planta de producción. Asimismo, se evaluarán los costos asociados con la producción, almacenamiento, transporte y distribución. Además, se calcularán las inversiones requeridas, posibles incentivos fiscales u otros estímulos gubernamentales que puedan influir en el flujo de caja. Este análisis económico permitirá determinar la viabilidad financiera de los métodos de distribución seleccionados y evaluar si representan una opción viable y rentable para Chile en términos de distribución de hidrógeno verde.

Resultados

Análisis Comparativo de Hidrógeno Verde en Chile y Australia

En primer lugar, se debe mencionar que se escogió Australia como país de comparación debido a que, según la tabla 5, será el país con mayor capacidad de producir Hidrógeno Verde en el año 2030. Esta proyección posiciona a Australia como un principal competidor de Chile en este aspecto estratégico. Según Agosin y Bitrán (2022), Chile posee mejores condiciones naturales que Australia para la producción de hidrógeno verde. Además, el diferencial de costo de transporte no es significativo en comparación, lo que se explica por la ubicación geográfica de Australia. Al igual que Chile, Australia se encuentra alejada de varios países desarrollados, lo que implica que los costos de transporte del hidrógeno verde no difieren mucho entre ambos países. Esto reduce la ventaja competitiva de Australia en términos de costos logísticos.

Por otro lado, Australia cuenta con importantes fuentes de energías renovables, especialmente en energía solar y eólica, lo que es crucial para la producción de hidrógeno verde. En la figura 5 se puede observar el potencial técnico solar mundial, donde se destaca el potencial de diferentes regiones para la generación de energía solar. Cabe destacar que, en dicho mapa, mientras más cerca del color blanco se esté, menor es el potencial solar, y mientras más cerca del color rojo, mayor es el potencial solar.

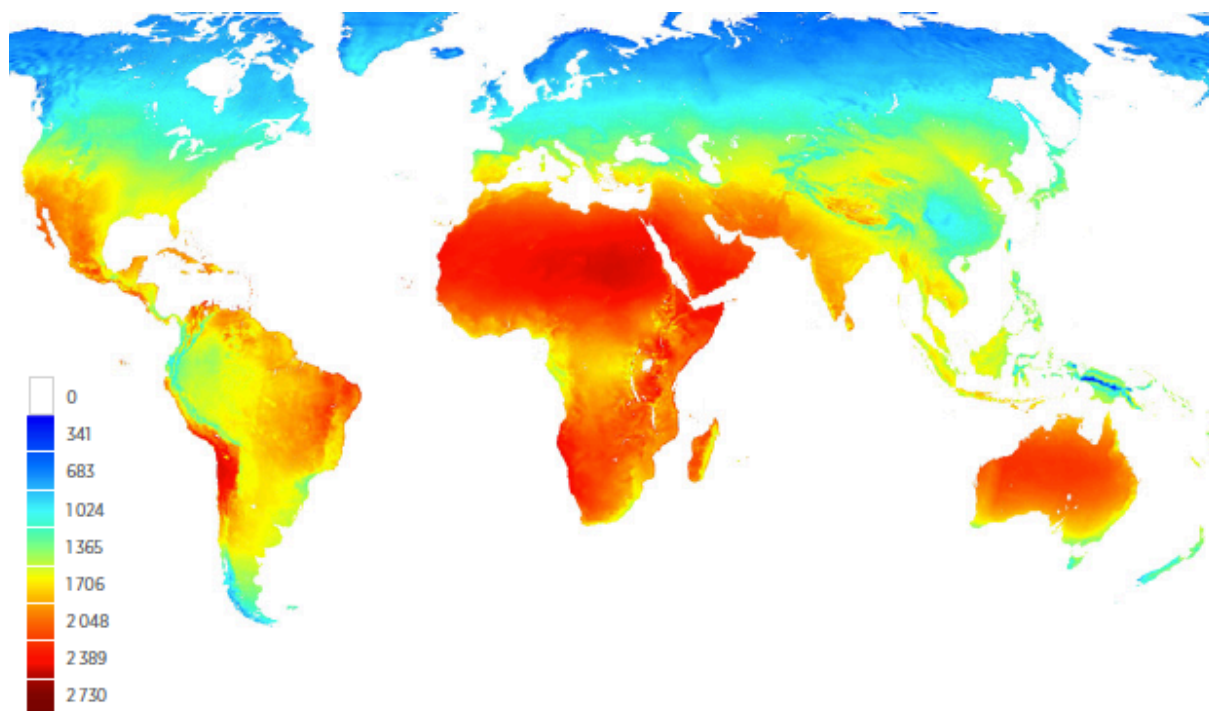


Figura 5: Potencial Técnico Solar Mundial. Adaptado de Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor, IRENA, 2022

A continuación, en la figura 6, se puede analizar el potencial técnico eólico mundial. Cabe destacar que mientras más cerca del color blanco se esté, menor es el potencial eólico, mientras que más cerca del rojo, mayor es el potencial eólico.

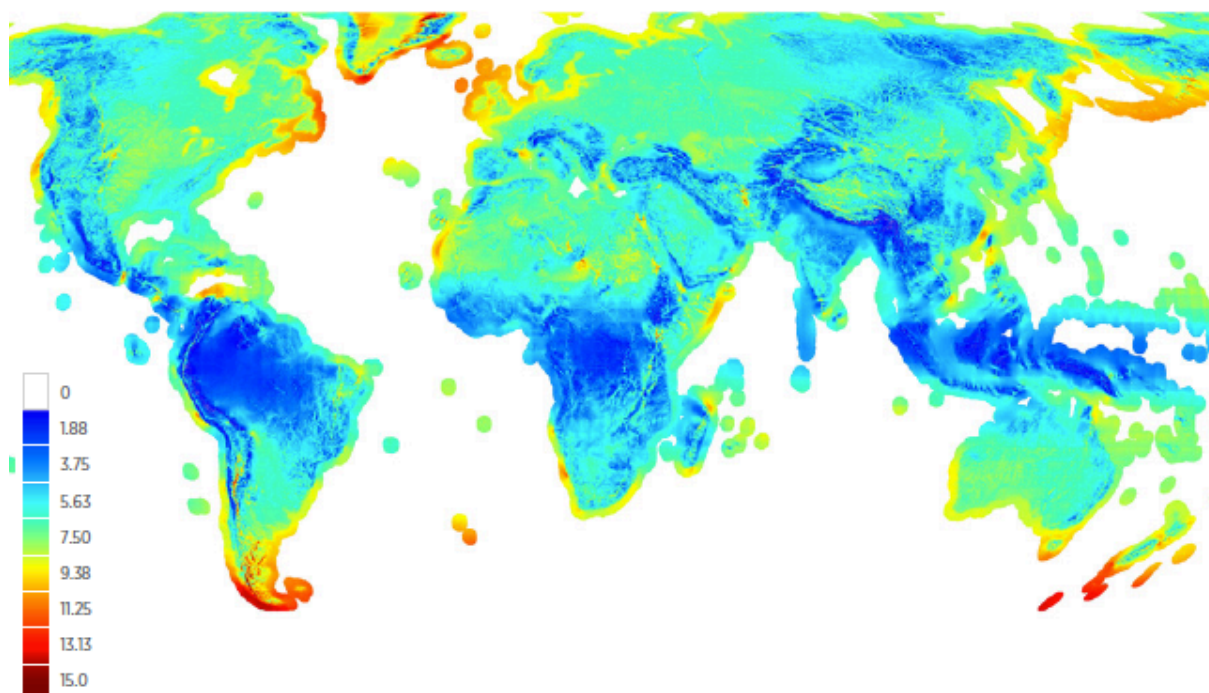


Figura 6: Potencial Técnico Eólico Mundial. Adaptado de Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor, IRENA, 2022

Si se comparan Australia y Chile con base en las figuras 5 y 6, se puede decir que ambos países tienen potenciales eólicos y solares similares, lo que hace de Australia un buen candidato para la comparación.

Finalmente, la figura 4 muestra que Australia es el país con más tratados internacionales, dejando a Chile en segundo lugar, lo que proporciona otro motivo para compararlos.

A continuación, se realizará un análisis a gran escala de la industria del hidrógeno verde, para obtener una perspectiva global del mercado, comparado con un país que es similar al nuestro. Además, al analizar estos se podrá identificar las condiciones bajo las que se podría exportar, y como la industria se podría posicionar competitivamente a nivel global.

Australia

En lo siguiente, se realizará un análisis PESTA (Político, Económico, Social, Tecnológico y Ambiental) y uno FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas) de Australia.

PESTA.

Político. En aspectos políticos Australia se encuentra bien posicionado, pues se lanzó la Australia's National Hydrogen Strategy (Estrategia Nacional de Hidrógeno de Australia) en el año 2019, la cual debe garantizar que Australia se posicione en el camino de ser un líder mundial en hidrógeno para el 2030 (DCCEEW, 2023), siendo la tercera nación en lanzar una estrategia con esta temática en el año 2019.

Por otro lado, el gobierno australiano ha lanzado distintos subsidios, subvenciones e incentivos fiscales sobre el hidrógeno verde y energías renovables, tal como el “Hydrogen Headstart Program” (DCCEEW, 2024b) en la cual el gobierno australiano invertirá \$4.000 millones de dólares para apoyar los ingresos de proyectos de hidrógeno renovable a gran escala de producción de hidrógeno, con lo cual se tiene como objetivo acelerar el desarrollo de la industria de hidrógeno en Australia, catalizar industrias de energía limpia y ayudar al país a conectarse a nuevas cadenas globales de suministro de hidrógeno. Así como este programa de financiamiento, existen otros, para incentivar la I+D del país y apoyar a pequeñas y medianas empresas para que realicen mejoras en eficiencia energética, entre otros.

Por otro lado, el gobierno australiano está muy comprometido con el medioambiente, por lo que creó el año 2024 la Agencia de Protección Ambiental de Australia (EPA por sus siglas en inglés) (DCCEEW, 2024b), la cual será responsable de la administración de todas las leyes ambientales nacionales del país, como la Ley de Protección del Medioambiente y Conservación de la Biodiversidad, la Ley de Reciclaje y Reducción de Residuos, entre otras. Además, la EPA podrá proporcionar una mejor orientación y educación para garantizar el cumplimiento de las reglas por parte de las

organizaciones, emitir órdenes de protección ambiental y utilizar poderes ampliados para auditar a las empresas.

Debido a la información entregada, se puede decir que Australia en el ámbito de energía limpia se encuentra bastante avanzada.

Asimismo, Australia ha firmado variados acuerdos internacionales, tal como muestra la figura 4, lo que facilita el desarrollo de mercados de exportación.

Económico. Además de los subsidios y fondos asignados por el gobierno para la industria de hidrógeno verde, varias inversiones de empresas privadas se han visto en este ámbito, tal como lo hará la Climate Impact Corporation (CIC) en colaboración con GE Vernova, en el que se invertirán 10.000 millones de dólares, el cual producirá 500.000 toneladas al año de hidrógeno verde cuando esté en pleno funcionamiento (O'Reilly, 2024). Así como este inversor, existen variados en Australia interesados en la producción de hidrógeno verde.

Por otro lado, un factor económico relevante es el costo de producción del hidrógeno, que se espera disminuya. Según Hidrógeno Verde (s.f.) actualmente el hidrógeno verde tiene un costo de \$13,3 y \$16,3 dólares australianos por kilo. Sin embargo, se espera que a medida que bajen los precios de las energías renovables y los electrolizadores se vuelvan más eficientes, el costo del hidrógeno se reduzca a \$2,4 o \$2,8 dólares australianos el kilo para el 2030.

Australia está posicionada para convertirse en líder mundial de exportación del hidrógeno verde, dado a que la demanda de hidrógeno verde está aumentando, y Australia posee una buena reputación en términos energéticos como exportador. Según OEC (s.f) Australia en el año 2022 exportó un aproximado de \$424 miles de millones de dólares,

siendo el exportador número 16 del mundo. Sus principales exportaciones fueron las briquetas de carbón, el mineral de hierro, el gas petróleo y el oro. Australia, al convertirse líder de la exportación de hidrógeno verde, tendría grandes oportunidades económicas para el país.

Social. Con respecto al factor social de la industria de hidrógeno verde en Australia, se espera que naturalmente aumente la concientización ambiental de las personas aceptando fácilmente el uso de hidrógeno verde en diversos sectores, sin embargo, según la Australia's National Hydrogen Strategy (2019, p.58), y dado a los estudios realizados, los australianos quieren que los gobiernos e instituciones de investigación confiables les proporcionen información de fácil comprensión y accesible. Debido a esto, Australia desarrollará un programa de educación comunitaria en el que proporcionará información clara y de fácil acceso sobre los riesgos, beneficios y uso seguro del hidrógeno, por lo que al desarrollar este programa, la sociedad debería aceptar más fácilmente los proyectos realizados al respecto.

Por otro lado, en el aspecto social, la Australia's National Hydrogen Startegy (2019, p.17) menciona que en un escenario optimista, la industria del hidrógeno creará aproximadamente 7.600 trabajos para los australianos, que incluirá puestos como técnico, trabajadores de oficios, ingenieros y profesionales, para que esto se logre y los australianos efectivamente se beneficien de esto, antes se necesita asegurar una educación y formación para trabajar en la industria de manera segura y legal. Es por esto, que en la Australia's National Hydrogen Strategy (2019, p.63) se propone que diferentes entidades, tales como instituciones, el gobierno y organizaciones de formación trabajen en conjunto para generar instancias educativas de calidad, tomando en cuenta las normas y códigos según estos se

vayan creando. En la actualidad ya existen instituciones, tales como TAFE Queensland, dictando clases respecto a qué es el hidrógeno, su seguridad, entre otros.

Tecnológico. En Australia existe una alta inversión en investigación y desarrollo de tecnologías avanzadas en la producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno verde. CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization) es una organización de investigación científica de Australia, creada hace más de 100 años por el Gobierno Australiano (DataCube Chile, s.f). Esta organización lanzó la “Misión de la Industria del Hidrógeno” en el año 2021, con el objetivo de aprovechar las capacidades de investigación de CSIRO en colaboración con el gobierno, la industria y la comunidad investigadora. Esta organización genera nuevas tecnologías en base a la investigación y desarrollo realizado sobre el hidrógeno. En el año 2023, y en línea con la “Misión de la Industria del Hidrógeno”, CSIRO lanzó un nuevo proyecto, en el cual se desarrollará un dispositivo de fácil implementación para producir hidrógeno en el punto de consumo, es decir, se generará un portador líquido que permitirá almacenar y transportar el hidrógeno de manera segura y eficiente hasta donde la energía será utilizada (CSIRO, 2023). Otra de las tecnologías que desarrolló CSIRO es la tecnología de electrólisis tubular de óxido sólido (tSOE por sus siglas en inglés), la cual ha atraído bastantes miradas, debido a la fácil obtención del hidrógeno mediante este método y a lo económico de este (Jordan-Peters, 2023). Estos dos casos son sólo dos ejemplos de los desarrollos tecnológicos que se están realizando actualmente en Australia. Existen más asociaciones y organizaciones llevando a cabo proyectos tecnológicos, como el NERA (National Energy Resources Australia), el Future Fuels Cooperative Research Center, entre otros.

Aunque no se trata de hidrógeno verde, Australia está actualmente desarrollando un proyecto en conjunto con Japón, un plan piloto con el objetivo de exportar hidrógeno hacia el resto del mundo. Este proyecto se denomina como “Cadena de Suministro de Energía de Hidrógeno” (HESC por sus siglas en inglés). A pesar de no ser hidrógeno verde, este hidrógeno a ser transportado es limpio, dado a que a pesar de ser producido en base a carbono, se realiza la captura y almacenamiento de este (Redacción, 2021). Este proyecto pretende demostrar la viabilidad de una cadena de suministro de hidrógeno comercialmente viable, y ambientalmente sostenible, con un enfoque en aumentar su escala a futuro. Australia además posee otros proyectos en proceso, como el HyNet.

Ambiental. Australia, al igual que muchos otros países, es parte del “Acuerdo de París” en el cual las partes se comprometen con el objetivo global de mantener el aumento de las temperaturas medias mundiales muy por debajo de 2°C y esforzarse aún más para que estén por debajo de los 1,5°C (DCCEEW, s.f.-a). En consecuencia, Australia lanzó el “Plan de Reducción de Emisiones a Largo Plazo”, con el objetivo de lograr emisiones netas igual a 0 para el año 2050 (IEA, 2023b). Es indudable que la producción de hidrógeno verde podrá contribuir de buena manera a este plan, ayudando a reducir las emisiones de carbono al mínimo, reemplazando los combustibles fósiles y conservando los recursos naturales, lo cual sería de gran ayuda para el país. Para poder producir el hidrógeno verde suficiente, se necesita una gran disponibilidad de energía renovable. Según el DCCEEW (s.f.-b), en el año 2022, el 32% de la generación de electricidad de Australia provino desde fuentes renovables, por lo cual, Australia se encuentra bien posicionado para seguir este patrón y así, lograr el objetivo para el año 2050.

Se debe considerar que para el proceso de electrólisis se necesita agua dulce, con el propósito de separar las moléculas de hidrógeno y oxígeno. Sin embargo, la escasez de agua es un problema persistente en Australia, por lo que el uso de desalinizadores es una opción viable, sin embargo, según Heggie (s.f) la desalinización es costosa y utiliza demasiada energía, tanto así que el agua que se obtiene recibe el nombre de “electricidad embotellada”. De hecho, existe una planta en Sydney que cuesta \$500.000 AUD al día incluso cuando está detenida. Además, se debe tener en cuenta el impacto ambiental de la desalinización. Según Buzonni (2024) la desalinización genera una gran problemática para aquellas zonas con gran importancia en los ecosistemas marinos. La desalinización separa la sal del agua, generando por un lado agua con sal, y por la otra agua dulce. Sin embargo, esta agua con sal posee el doble de sal que el agua de mar normal, además de químicos nocivos para el ecosistema marino, por lo que se debe tener especial cuidado al desecharla. A pesar de esto, según el Gobierno de Victoria (2023) actualmente existen 270 plantas de desalinización en Australia, la mayoría de ellas a pequeña escala.

FODA.

Fortalezas.

- ***Abundantes Recursos Naturales.*** Según la Australia's National Hydrogen Strategy (2019, p.10) no existe un país mejor posicionado que Australia para aprovechar la energía solar. Además, este documento menciona que posee excelentes recursos eólicos en sus costas del sur y oeste. Basado sólo en la calidad de recursos eólicos, solares e hidroeléctricos, se estima que un 11% del país es altamente adecuado para la producción del hidrógeno verde.

Asimismo, la Australia's National Hydrogen Strategy (2019, p.10) menciona que, para formar hidrógeno verde, se debe utilizar agua, la que será desalinizada o residuales. Bajo este contexto, se estima que sólo un 3% del país son áreas costeras altamente adecuadas para la producción de hidrógeno verde, es decir, aproximadamente 262.000 km^2 . Según indica la Estrategia de este país, esta cantidad de tierra satisface más de la demanda global predicha.

- ***Captura y Almacenamiento de Combustibles Fósiles y Carbono.*** Según la Australia's National Hydrogen Strategy (2019, p.13), Australia está bien posicionado para aprovechar las tecnologías de captura y almacenamiento de carbono para producir hidrógeno de bajas emisiones a partir de carbón y gas natural, y para que esto sea factible, es probable que se requieran tasas de captura del 90% o más. En Australia, existen variadas áreas prometedoras que se encuentran próximas a fuentes de carbón o gas y a almacenamientos subterráneos de dióxido de carbono, lo que permitiría producir hidrógeno bajo en emisiones. Como ya se mencionó anteriormente, Australia ya está llevando a cabo esto en su proyecto HESC, por lo que ya tienen experiencia en exportar hidrógeno limpio.
- ***Apoyo del Gobierno hacia las Industrias.*** La Australia's National Hydrogen Strategy (2019, p.14) hace mención de lo simple que es realizar negocios en el país, a comparación de otros países productores de hidrógeno. Según esta estrategia Australia posee un historial ejemplar con inversionistas en industrias de exportación a gran escala. Tal como se mencionó anteriormente, el Gobierno

australiano ya ha acelerado la industria del hidrógeno, generando fondos que apoyarán a industrias a ingresar nuevos proyectos de hidrógeno limpio.

- ***I+D.*** Según la Australia's National Hydrogen Strategy (2019, p.14) Australia se encuentra en la cima del ranking mundial de impacto en investigación sobre hidrógeno. La comunidad australiana trabaja con otros países destacados en el uso de hidrógeno, lo que proporciona una base sólida para colaboración futura. Actualmente, más de 30 proyectos piloto se están desarrollando en el país, entre ellos, los ya mencionados en el factor "*tecnológico*" del PESTA.
- ***Experiencia.*** Según la Australia's National Hydrogen Strategy (2019,p.14) el país posee valiosa experiencia en la construcción de nuevas industrias a gran escala, en especial en la industria del gas licuado y del sector de energías renovables. Desde la década de 1960, la industria australiana del gas licuado ha crecido, hasta convertirse en uno de los mayores exportadores de gas licuado del mundo. Por otro lado, Australia se ha convertido en líder mundial en el despliegue de la energía renovable.
- ***Acuerdos Internacionales Bilaterales y Multilaterales.*** Según la Australia's National Hydrogen Startegy (2019, p.54), Australia considera que los acuerdos bilaterales son cruciales para la industria del hidrógeno, por lo que el país busca establecer asociaciones con el fin de promover el comercio y la inversión en hidrógeno, para apoyar el ritmo de la investigación y desarrollo, el despliegue de modelos piloto, entre otros. En la figura 4 se puede ver la cantidad de acuerdos bilaterales que posee Australia hasta noviembre de 2021, siendo el país que posee más acuerdos bilaterales entre los países que se muestran.

- **Educación y Capacitación para Australianos.** Con respecto a la educación y capacitación de los australianos en la industria del hidrógeno verde, Australia planifica crear alrededor de 7.600 empleos para el año 2050, por lo que para que la población esté preparada para esto, se debe educar y capacitar a los australianos. Según lo mencionado en el factor “*social*” del PESTA, ya existen instituciones dictando clases con respecto a este tema.

Oportunidades.

- **Creciente Demanda.** Según Gulli et al.(2024) la demanda de hidrógeno depende del escenario en el que se esté, sin embargo, en cada escenario la demanda del hidrógeno limpio aumenta. Por otro lado, se espera que la demanda del hidrógeno gris disminuya en cada uno de los escenarios.

Según esta fuente, existen 5 escenarios posibles en la industria del hidrógeno, que se detallan a continuación:

- **Cero Neto.** Escenario en el cual todos los países hacen compromisos de cero emisiones netas para el año 2050, a través de políticas ambiciosas.
- **Compromisos Alcanzados.** Escenario en el cual los países líderes se comprometen a producir cero emisiones netas a través de políticas exitosas, y los seguidores transitan a un ritmo más lento.
- **Aceleración Mayor.** Escenario en el cual existe una aceleración de transición impulsado por compromisos específicos de cada país, aunque persisten limitaciones financieras y tecnológicas.
- **Trayectoria Actual.** Escenario en el cual la trayectoria de las energías renovables y la disminución de los costos de electrolizadores continúa,

sin embargo, las políticas actuales no son suficientes para cerrar la brecha de lo planificado.

- **Pérdida de Impulso.** Adopción retrasada de los vehículos eléctricos de celdas de combustible (FCEV) en el transporte, además de la adopción de combustibles alternativos en la aviación, lo que reduce la demanda del hidrógeno.

En la figura 7 se puede ver el aumento de la demanda de hidrógeno limpio por cada escenario mencionado. Además, se puede ver la disminución de la demanda del hidrógeno gris por escenario.

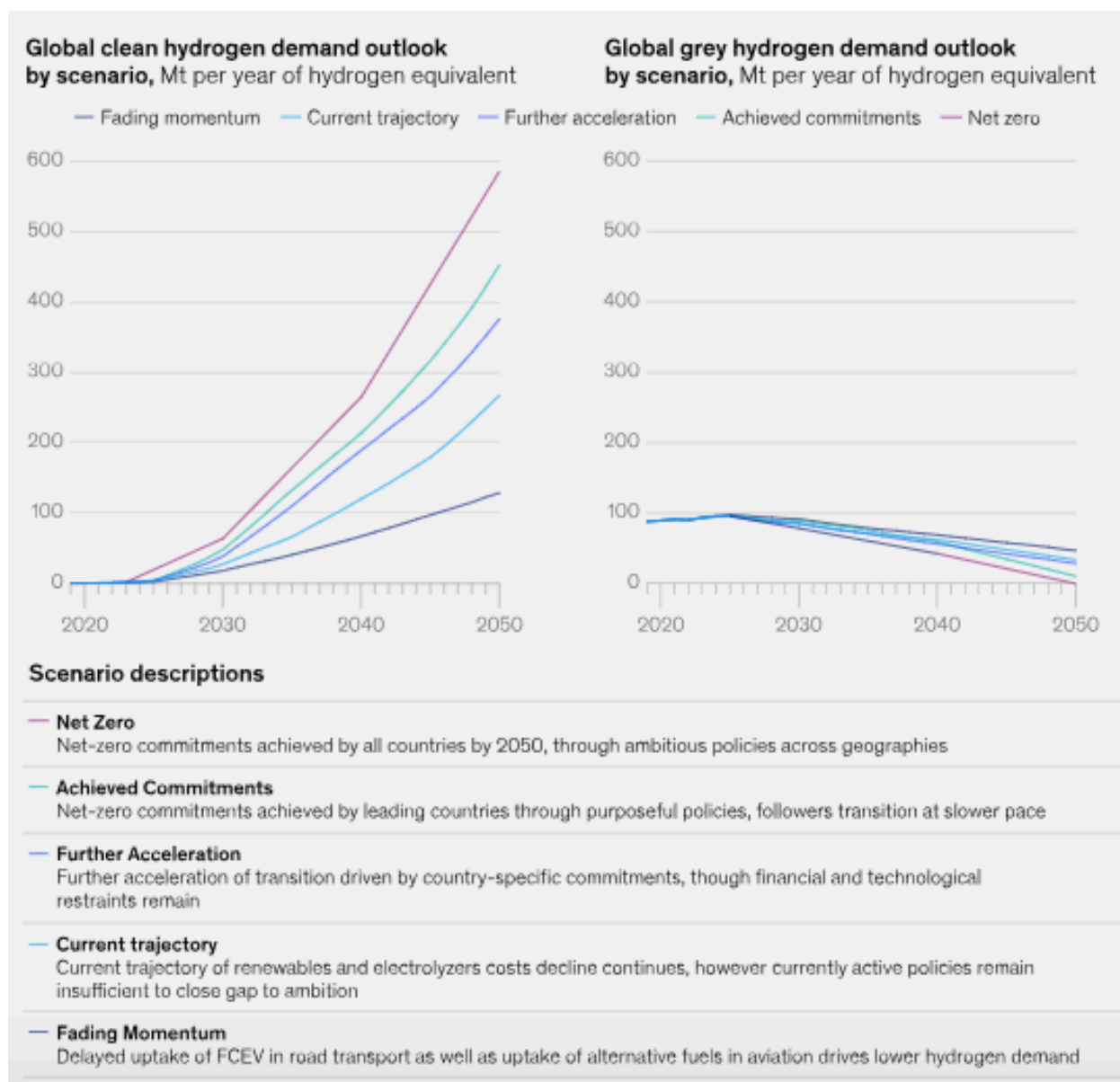


Figura 7: La demanda del hidrógeno limpio se espera que alcance de 125-585 millones de toneladas por año para el 2050, en cada escenario. Adaptado de Perspectiva energética mundial 2023: perspectivas del hidrógeno, Gulli et al., 2024.

Se puede concluir de la figura 7 que la mejor oportunidad para Australia es el escenario en el cual todos los países hacen compromisos de emisiones netas igual a 0 para el año 2050, realizando esto a través de políticas ambiciosas. A pesar de esto, cualquier escenario sería beneficioso para el país, pues la

demanda siempre aumenta, por lo que tienen la posibilidad de vender más hidrógeno limpio.

- ***Creación de Empleos.*** Según la Australia's National Hydrogen Strategy la industria del hidrógeno verde generará, en el mejor de los casos, aproximadamente 7.600 nuevos trabajos para las personas, lo que es una buena oportunidad para la comunidad australiana, y por lo tanto, para el país.
- ***Uso Doméstico.*** Una vez que el costo del hidrógeno disminuya, debido a los avances tecnológicos y a la escala de producción del hidrógeno, este se podrá integrar a la estructura del mercado energético, beneficiando a la sociedad australiana, debido a que la energía consumida será limpia, sin producir contaminación al medio ambiente, además de ser estable en toda ocasión.
- ***Posicionamiento en la Industria.*** Australia está actualmente bien posicionado en la industria del hidrógeno verde. Según Zavia (2024), Australia se ha posicionado como un jugador clave en el mercado de exportación de hidrógeno, debido a las inversiones que se realizan en el país. En el caso en que Australia siga este camino, este se podrá convertir en uno de los países mejor posicionados para la producción y exportación de hidrógeno verde, trayendo beneficios importantes a la economía del país, pues los ingresos debido a este efecto serán enormes.
- ***Baja de Costo.*** Actualmente, el costo de producir hidrógeno verde es alto debido a que el costo de las tecnologías para producirlo es alto, sin embargo, esto se debería ir reduciendo a medida que las tecnologías se vuelven más maduras. Australia posee el objetivo de tener un costo de \$2 AUD por kilogramo de

hidrógeno verde para el 2030 (IRENA, 2022b, p.92), mientras que actualmente posee un costo de entre \$13,3 AUD y \$ AUD (Hidrógeno Verde, s.f.). Esta baja de costo representa una oportunidad importante para Australia, pues podrá entrar a la competencia internacional con facilidad.

Debilidades.

- ***Costo.*** El costo de producción de hidrógeno verde actualmente es muy alto. Como ya se mencionó anteriormente, el hidrógeno producido en Australia actualmente posee un precio de entre \$8,74 USD y \$10,91 USD por kilo. Si este costo se compara con fuentes de energía no renovable, tales como el petróleo, el costo es muy elevado. Según la OPEP (Organización de Países Exportadores de Petróleo) (2024), el precio del barril de petróleo actualmente es de \$77,84 dólares, lo cual equivale a \$0,58 USD por kilo. Si se promedia el costo del hidrógeno verde, esto da un costo promedio de \$9,825 USD por kilo, lo que genera una diferencia de \$9,245 USD por kilo. Se puede notar que la diferencia de costos es muy grande. Esta diferencia de precio se da debido al costo de los electrolizadores, el agua utilizada, la energía renovable utilizada, entre otros.
- ***Dependencia Tecnológica.*** Cómo ya se ha mencionado previamente, la producción de hidrógeno verde está sujeta a las nuevas tecnologías que vayan surgiendo y que sean más económicas que las ya existentes. En el caso de la exportación de hidrógeno verde, esta dependencia se incrementa, pues para poder exportar hidrógeno verde a gran escala, se debe tener la confianza de que la tecnología que se use debe ser la más segura de todas, en términos de protección del personal que trabaja con este. Además, como el hidrógeno verde

es un nuevo portador de energía, la información existente no es suficiente, por lo que la investigación y la tecnología son fundamentales para el avance de este portador de energía.

- ***Infraestructura.*** Según Neelotpal (2023), cuando se habla de infraestructura necesaria para la producción y venta del hidrógeno verde, se hace referencia al sistema de instalaciones, tecnologías y redes necesarias para la generación, almacenamiento, transporte y distribución del hidrógeno como portador de energía. A pesar de que Australia posee infraestructura para la producción de hidrógeno verde, si la demanda de este portador energético sigue aumentando, y Australia aumentara la producción, la infraestructura que este posee actualmente no es suficiente, por lo que debe generar centros de producción y distribución más grandes, necesitando mayores inversiones en este aspecto.
- ***Agua Desalinizada.*** Como ya se mencionó anteriormente, Australia posee un importante problema de escasez de agua, por lo que surge la alternativa de la desalinización de agua. Sin embargo, como ya se mencionó, Australia posee en su mayoría plantas de desalinización a pequeña escala, por lo que, de aumentar la demanda de hidrógeno verde, estas no serían capaces de entregar el agua necesaria para la creación de hidrógeno. Es por esto que Australia debe construir plantas desalinizadoras de mayor escala y en lugares estratégicos.

Amenazas

- ***Impacto Ambiental de la Desalinización.*** La desalinización de agua es un método utilizado para convertir agua salada a agua dulce. Para esta, se toman cantidades de agua del mar, se procesan y luego se desecha, por un lado, agua

con sal, y por el otro, agua dulce. Como ya se mencionó, una de las complicaciones más grandes es la cantidad de energía que se consume para producir el agua es demasiada. Considerando que en la actualidad aún parte de la electricidad proviene de combustibles fósiles, este método no es muy amigable ambientalmente. Por otro lado, se debe tener en consideración los ecosistemas marinos, ya que, al desechar la salmuera del proceso, estos ecosistemas podrían sufrir consecuencias.

- ***Competencia Internacional.*** Aunque Australia posea variados recursos que lo hacen tener ventaja en la producción y exportación del hidrógeno verde, existen más países que poseen los recursos para poder producirlos, y si estos son más rápidos que Australia en producir y vender este a otros países, Australia quedará atrás en esta competencia internacional. Es importante que Australia observe y analice los posibles escenarios a los que se enfrenta, qué países son los posibles ganadores y cómo lograr ganar esta competencia.
- ***Volatilidad de Mercado.*** Debido a la incerteza de la industria del hidrógeno, no se sabe qué escenario se enfrentará a futuro, si la demanda aumentará o se mantendrá constante. Es por esto que la Australia's National Hydrogen Strategy (2019, p. 29) realiza el análisis de cuatro posibles escenarios, que se describirán a continuación:
 - ***Hidrógeno: La Energía del Futuro.*** Hace referencia a una fuerte adopción del hidrógeno en los sistemas energéticos globales. Esta adopción será impulsada por compromisos globales fuertes y tempranos para reducir emisiones de carbono.

- ***Despliegue Dirigido.*** Este escenario hace referencia a un creciente uso del hidrógeno enfocado en sectores de alto valor, como sectores con pocas alternativas de bajas emisiones. Adopción impulsada por aumento en los esfuerzos globales por avances hacia electricidad con menores emisiones de carbono.
- ***Negocio Como Siempre.:*** Escenario en que el mercado global crece en línea con las tendencias existentes.
- ***Avance Eléctrico.*** Electricidad “limpia” puede satisfacer casi todas las necesidades energéticas, por lo que, a pesar de los compromisos globales por reducir emisiones de carbono, la adopción del hidrógeno es mínima.

El mercado global del hidrógeno, según estos 4 escenarios, se puede observar en la figura 8:

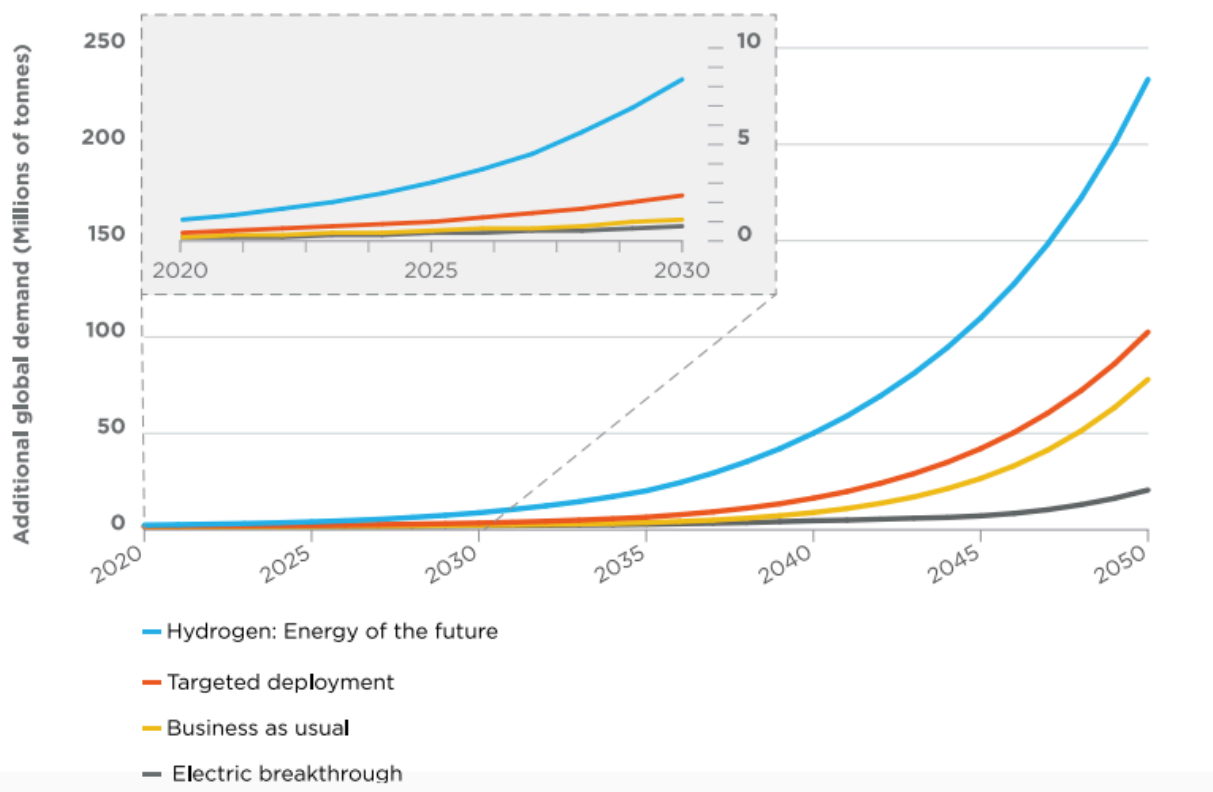


Figura 8: Resultados de los escenarios de crecimiento del mercado mundial del hidrógeno. Adaptado de Australia's National Hydrogen Strategy, DCCEEW, 2019.

Se puede ver que si bien, existen escenarios ventajosos para Australia, tales como el de “Hidrógeno, la energía del futuro” y “Despliegue Dirigido”, los escenarios que restan no son tan beneficiosos. Incluso al existir incertidumbre sobre lo que pasará en el futuro, Australia debe tomar una decisión sobre cómo llevar adelante la producción de hidrógeno.

- **Regulaciones.** A pesar de que el hidrógeno verde es una energía limpia, podrían existir regulaciones en cuanto a la materia prima que este utiliza. Dado a que el hidrógeno verde utiliza agua en su proceso, el Estado podría generar restricciones en cuanto al uso de esta, o en cuanto al uso de desalinizadores para obtenerla. También, el estado podría generar impuestos por la generación de

hidrógeno y por la exportación de este, lo que sería una amenaza para la industria.

Chile

A continuación, se realizará un análisis macroeconómico PESTA (Político, Económico, Social, Tecnológico y Ambiental) y uno microeconómico FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas) para Chile.

PESTA.

Político. El Gobierno de Chile, en el año 2020, lanza la “Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde”, que es una estrategia que posee 3 objetivos principales: producir el hidrógeno verde más barato del planeta para el 2030, estar entre los tres principales exportadores para 2040 y contar con 5 GW de capacidad de electrólisis en desarrollo para el 2025 (Gobierno de Chile, s.f-a). Posteriormente, el año 2024 el Gobierno de Chile construyó un plan que busca contribuir a la descarbonización energética nacional para alcanzar la meta legal de que Chile sea un país carbono neutral antes del 2050, llamado “Plan de Acción Hidrógeno Verde (2023-2030)”. Este plan, además de contribuir a la descarbonización, busca industrializar la economía nacional, acompañado con un cambio de industrias contaminantes hacia industrias sostenibles (Ministerio de Energía, s.f-b) .

Actualmente, en Chile la Corporación de Fomento de la Producción de Chile (CORFO) está entregando subsidios y financiamiento para proyectos e investigaciones relacionadas con el hidrógeno verde, tales como el Centro Tecnológico Para la Innovación del Hidrógeno Verde en Magallanes, subsidio en el cual se entregarán hasta seis mil millones de pesos para establecer un centro dedicado a la investigación y desarrollo (I+D) de tecnologías avanzadas para la producción y uso del hidrógeno verde (CORFO,2024a),

el Subsidio de Fabricación y/o Ensamblaje y sus componentes en Chile, el cual busca entregar apoyo financiero para incentivar la producción local de electrolizadores, reduciendo la dependencia de importaciones y potenciando la industria del hidrógeno verde en Chile (CORFO, 2024b), entre otros. Además, el Gobierno de Chile anunció un fondo de mil millones de dólares para impulsar el hidrógeno verde en el país, con el propósito de apoyar la producción de hidrógeno verde y derivados, junto con de impulsar la inversión de proyectos en el país (Generadoras, 2023).

Por otro lado, el Gobierno chileno está interesado en crear Alianzas estratégicas y Memorandos de Entendimiento (MOUs por su sigla en inglés), con el propósito de compartir el conocimiento, acceder a nuevas tecnologías, atraer inversiones, reducir riesgos, entre otros. Según la figura 4, Chile posee Alianzas o MOUs con Alemania, Países Bajos y Bélgica.

Económico. Además de los subsidios y financiamientos que entregará el Gobierno de Chile y la CORFO para el desarrollo de los proyectos de hidrógeno verde, existen inversiones extranjeras y nacionales para generar plantas de producción de hidrógeno verde en el país. Una de ellas, que ya se encuentra en construcción, es la de “Haru Oni” en la región de Magallanes, Chile. Esta planta utilizará energía proveniente de un aerogenerador de 3,4 MW, y producirá bio combustibles, mejor conocidos como “e-fuels”. Esta planta es financiada por empresas como ENEL Green Power Chile, AME, ENAP, Siemens Energy y Porsche (Ini, 2023). Según Lauerer (2023) los costos de construcción de la planta fueron mayores de \$74.000.000 US. Tal como este proyecto, existen otros que son de financiamiento privado como subsidios y financiamiento del Estado, que promueve la creación de generación de hidrógeno verde.

Por otro lado, un factor económico que afecta a la industria de hidrógeno verde en Chile, son los costos de producción. Actualmente, un kilogramo de hidrógeno verde cuesta entre \$4 USD y \$5,5 USD en Chile, sin embargo, se proyecta en varios estudios que el costo podría llegar a ser de entre \$1,5 USD y \$2,5 USD en el país (Gobierno de Chile, s.f-b).

Por último, se debe mencionar que Chile posee un buen mercado de exportación. El año 2023 obtuvo el número 42 en el ranking de países según el importe de sus exportaciones (Exportaciones Chile, 2023), siendo sus principales exportaciones minerales y metales, productos agropecuarios y celulosa (Solunion,2022). Debido a que Chile es un país exportador, este posee puertos y redes logísticas eficientes que permitirían que el hidrógeno verde se exporte de la mejor manera posible. Además, Chile posee la experiencia de exportación de energía limpia, pues esta se exporta hacia Argentina, a través de una interconexión eléctrica (El mostrador, 2022).

Social. Según la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde en Chile (2020, p.14), a través de los años, Chile ha sido públicamente reconocido por estar basado en recursos no renovables, por lo que añadir un valor verde a las exportaciones, y producir energéticos limpios es un gran avance para el país y la comunidad de este. El hidrógeno verde permitiría producir cobre “verde”, energéticos limpios y exportaciones con baja huella de carbono. Esto en general, es un avance del país y de la sociedad de este, que contribuyen a que esto sea posible.

Según la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde en Chile (2020, p.27) se asegurará la participación de la comunidad, abriendo el diálogo entre los desarrolladores de proyectos de hidrógeno y las comunidades cercanas a este. Esto se realizará capacitando

a los actores y fortaleciéndolos técnicamente con el objetivo de que estos den su opinión informada y objetiva sobre estos proyectos. Realizando esto, se tendrá tanto una sociedad informada como una activa en el proceso de los proyectos.

Por otro lado, la comunidad chilena tendrá como beneficio el uso de electricidad verde, pues se pretende hacer el cambio de la generación eléctrica basada en combustibles fósiles. Se quiere realizar esto mediante sistemas aislados o medianos que no estén conectados al Sistema Eléctrico Nacional, pues actualmente los sistemas aislados o medianos son en base a combustibles fósiles, por lo que la idea es reemplazar esto.

Además, según el Ministerio de Energía (s.f.-a, p.14) en los próximos veinte años en Chile, la industria del hidrógeno verde generaría más de 100.000 empleos, además de capacitación a la ciudadanía. En la actualidad, en Chile ya se están llevando a cabo capacitaciones, con el fin de educar a las personas con respecto al hidrógeno verde. Un ejemplo de esto es el curso “Oportunidades y Aplicaciones” llevado a cabo por la CORFO, en el cual enseñan a las personas, especialmente mujeres, a preparar proyectos vinculados a la generación de hidrógeno verde en base a criterios tecnológicos, estratégicos y económicos (CORFO, 2023). Como este curso, también existen otros que son pagados y auspiciados por universidades, como la Universidad Técnica Federico Santa María y la Universidad de Concepción.

Tecnológico. En Chile, actualmente existen diversas infraestructuras tecnológicas necesarias para producir hidrógeno verde, así como estudios de esto. Según Bertram (2024) se debe encontrar una solución al requerimiento de agua de los electrolizadores, pues Chile está pasando por una escasez de agua que afecta todas las regiones. Según Portal Minero (2023a) hoy en día existen 24 plantas desaladoras produciendo más de 8.000 litros por

segundo. Además, existen variadas iniciativas de proyectos del mismo aspecto, y seminarios, estudios e investigaciones que se realizan para revisar el estado actual de la desalinización en Chile, abordar perspectivas legales, medioambientales, tecnológicas, entre otros (Portal Minero, 2023b)

Por otro lado, y ya mencionado anteriormente, existen variados proyectos en construcción en Chile, los que se han instalado con infraestructura necesaria para producir hidrógeno verde. El proyecto “Haru Oni” ya descrito es uno de ellos. Otro ejemplo de esto es HyEx, liderado por Enaex asociado con Engie, el cual tiene como objetivo generar amoníaco verde para la utilización en sus plantas de minería y descarbonizar estas (Enaex, s.f). Según Minería Chilena (2023) en este proyecto se estudiarán tecnologías para el funcionamiento de la planta, además, el proyecto servirá como pionero en la implementación y estudio de estas para producir un combustible que sea amigable con el medioambiente y que a futuro ayude a reemplazar los combustibles fósiles.

Por otro lado, como ya se mencionó anteriormente, las alianzas y Mou’s realizados con otros países también son de principal apoyo para la investigación y estudio de tecnologías, por lo que Chile puede aprovechar esto con los países que posee relación.

Ambiental. Si bien el hidrógeno verde es un portador energético que posee bastantes beneficios, este también posee un impacto ambiental, dado a que para su proceso, se necesita utilizar agua dulce para los electrolizadores, y como ya se mencionó previamente, Chile posee escasez de agua, por lo que una de las alternativas es utilizar agua desalinizada, sin embargo, esto implicaría que la salmuera fuese arrojada a los suelos o a las fuentes de agua, lo que produciría daño a la vida que se presente en ese lugar (Hurwitz et al., 2023). Debido a que no hay estudios suficientes sobre qué es lo que se debe hacer con la salmuera

sobranante de procesos de desalinización, se deben realizar más sobre esto antes de seguir construyendo desalinizadoras.

Es indudable que Chile, a pesar de la barrera mencionada, está bien posicionado para producir hidrógeno verde debido a las fuentes de energía renovable que hay en el país. Es más, según el Ministerio de Energía (2024) el primer trimestre del 2024 la generación de energía en base a ERNC fue de un 41%, en promedio, 4% más que la del 2023. Esto es debido a que Chile se ha comprometido a llegar a la carbono neutralidad para el 2050, y ha planeado cerrar 21 centrales de carbón para el 2040, convirtiendo la matriz energética en una más limpia (Barlett, s.f). Según esto, se puede ver que más allá de los beneficios económicos, sociales y políticos que traerá el hidrógeno verde al país, Chile está comprometido a poseer una matriz energética más limpia y sustentable.

Lo anterior es debido a que Chile está comprometido con los objetivos del Acuerdo de París. Esto es limitar el aumento de temperatura por debajo de los 2°C e idealmente, bajo los 1,5°C (Ministerio del Medioambiente, s.f). Este acuerdo fue ratificado el año 2017, y subraya el compromiso gubernamental de transitar a una matriz energética más sostenible. En este contexto, Chile lanza la Ley Marco de Cambio Climático, la que establece la gobernanza climática, facultades y obligaciones de los organismos del Estado para la acción climática y establece la meta de carbono neutralidad para el año 2050 (CEPAL, 2022)

FODA.

Fortalezas.

- ***Abundantes Recursos Naturales.*** Según la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde Chile (2020), el país posee más de 1800 GW de potencial energético

renovable, donde cada sector está caracterizado por su tipo de energía. En el Norte se encuentra la radiación solar más alta del planeta, mientras que en el sur se encuentra una buena energía eólica. Dado esto, Chile es uno de los países que posee altas posibilidades de producir hidrógeno verde.

- ***Compromiso Gubernamental.*** El Gobierno de Chile ha demostrado un interés sostenido en el desarrollo de la industria del hidrógeno verde. Este compromiso se refleja en la publicación de la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde en 2020, documento clave que establece las bases para convertir a Chile en un líder mundial en la producción y exportación de hidrógeno verde. Posteriormente, en 2024, el gobierno refuerza su enfoque estratégico con el lanzamiento del Plan de Acción de Hidrógeno Verde, que detalla las medidas y objetivos específicos para avanzar en esta industria. Además, el gobierno destina subsidios para apoyar proyectos innovadores de hidrógeno verde, mediante colaboraciones entre Ministerios debido a que esta iniciativa afecta más de un solo sector (Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, s.f).
- ***Infraestructura de Exportación.*** Como se sabe, Chile es un país exportador de variados productos, por lo que se asumiría que tiene una buena red logística para esto. Un indicador que puede confirmar esto, es el de Indicador de Desempeño Logístico (LPI por sus siglas en inglés). Este indicador, mide la eficiencia de los sistemas logísticos de los países, evaluando aspectos como la eficiencia de los procedimientos aduaneros, la calidad en la infraestructura de transporte, los envíos nacionales a precios competitivos, la calidad de los servicios logísticos, la capacidad de seguimiento y trazabilidad de la carga y la puntualidad de los

envíos. Este índice se calcula en base a una escala del 1 al 5 entregada por expertos del sector logístico. Bajo este contexto, Chile quedó en el tercer lugar de países latinoamericanos con su puntaje de 3,0, mientras que, a nivel global quedó en el puesto 61º, en un puesto bastante alto teniendo en consideración que son 139 países (CAMPORT, 2023)

- ***Subsidios y Apoyo Financiero.*** La industria del hidrógeno verde en Chile posee una serie de subsidios y apoyos financieros, detallados en el factor económico del PESTA. El país no solo está en condiciones de recibir financiamiento privado, sino que también ofrece financiamiento estatal significativo. Esta combinación de recursos financieros es crucial para acelerar el desarrollo de la industria, facilitando un crecimiento más rápido. Como resultado, Chile estará mejor posicionado para destacarse a nivel global en la competitiva industria del hidrógeno verde, consolidándose como un líder en el mercado internacional.
- ***Acuerdos Internacionales Bilaterales y Multilaterales.*** Chile posee variados acuerdos bilaterales, tal como se puede ver en la figura 4, y busca generar más a lo largo del tiempo. Estos tratados son útiles debido a que se busca promover el comercio y la inversión del hidrógeno apoyando el ritmo de la investigación y desarrollo, el despliegue de proyectos, entre otros.

Oportunidades.

- ***Creciente Demanda.*** Tal como se puede ver en la figura 7, la demanda del hidrógeno verde aumentará en cualquier de los escenarios, siendo el más beneficioso el escenario del cero neto, pues es donde más aumenta la demanda de hidrógeno, y, por ende, más ventas se pueden producir

- ***Liderazgo en Exportación.*** El desarrollo de Chile en la industria del hidrógeno verde con precios competitivos en el mercado podría aumentar significativamente su competitividad global, posicionando al país como un líder en la exportación de hidrógeno verde. Esta ventaja se verá reforzada por las alianzas estratégicas con otros países, que proporcionarán acceso a conocimientos avanzados sobre tecnologías emergentes. Esto permitirá a Chile innovar en métodos de distribución y ser pionero en exportación a gran escala, lo que generaría importantes ingresos y fortalecería su economía a nivel internacional.
- ***Atracción de Inversiones Extranjeras.*** Chile tiene un gran potencial para beneficiarse de las inversiones extranjeras en la industria del hidrógeno verde. Para aprovechar esta oportunidad, el país debe continuar ofreciendo subsidios y financiamientos atractivos que capten la atención de los inversores internacionales. Además, es esencial que Chile demuestre su capacidad para desarrollar infraestructuras eficientes en el ámbito de las energías renovables, lo que generaría confianza en las instituciones privadas. Al consolidar su reputación como un mercado fiable y con potencial de crecimiento, Chile estaría en una posición favorable para atraer inversiones extranjeras, impulsando así el desarrollo y expansión de la industria del hidrógeno verde.
- ***Innovación y Desarrollo Tecnológico.*** Chile tiene el potencial de aprovechar el desarrollo de nuevas tecnologías para fortalecer su posición en el mercado global. Esto podría mejorar significativamente la competitividad del país y atraer a un mayor número de inversores privados interesados en la industria del

hidrógeno verde. La innovación y el desarrollo tecnológico representan una oportunidad clave para impulsar el crecimiento de esta industria en Chile, permitiendo al país avanzar en su transición hacia una economía más tecnológicamente avanzada.

- ***Baja de costo.*** Según la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde de Chile (2020), se proyecta que el hidrógeno verde producido en el norte de Chile será uno de los más competitivos a nivel global. Se estima que el costo nivelado de producción podría alcanzar los \$0,8 USD por kilogramo, lo que lo posicionaría como el más bajo del mundo, excluyendo los costos de compresión, transporte y distribución. Esto se debe a las condiciones óptimas de energía renovable que existen en esa región.
- ***Beneficios sociales.*** El sector del hidrógeno verde en Chile promete varios beneficios sociales. Entre ellos, la incorporación del hidrógeno verde en la matriz energética chilena, lo que contribuiría a una sociedad más sostenible, al fomentar el uso de energías limpias. Además, esta industria no solo creará más de 100.000 empleos, sino que también ofrecerá formación y capacitación especializada en este ámbito, brindando a la comunidad chilena la oportunidad de mejorar sus habilidades y conocimientos, impulsando el crecimiento personal y profesional.

Debilidades.

- ***Costos.*** Según el Gobierno de Chile (s.f-b) , el costo de un kilogramo de hidrógeno verde es de \$4 USD y \$5,5 USD. Como ya se mencionó anteriormente, el precio de un kilogramo de petróleo es de \$0,58 USD. Si se

promedia el costo del hidrógeno verde en Chile, genera un costo de \$4,75 USD por kilogramo de este, generando una diferencia de \$4,17 USD, una gran diferencia de costos, por lo que el hidrógeno actualmente no es competitivo en el mercado. Sin embargo, de acuerdo a lo ya mencionado, la probabilidad de que el precio baje a largo plazo es alta.

- ***Dependencia de Subsidios.*** El Gobierno ha asignado y asignará diferentes subsidios para proyectos relacionados con hidrógeno verde, sin embargo, existe el cuestionamiento de qué sucedería si el Gobierno no interviniera en esto. Las inversiones privadas podrían no ser suficientes para sostener el desarrollo de la industria a largo plazo, especialmente si los subsidios se reducen o eliminan. Esto podría llevar a una desaceleración en la implementación de proyectos de hidrógeno verde y limitar la capacidad de Chile para competir en el mercado global.
- ***Dependencia Tecnológica.*** Chile no se destaca por la investigación y desarrollo. De hecho, el 2022 se invirtió solo un 0,34% del PIB en esto, sin existir un mayor crecimiento en esto en los últimos 10 años (Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, 2022). Es por esto que existe una dependencia tecnológica de Chile y de otros países, de investigaciones que puedan ser útiles para el desarrollo de la industria del hidrógeno verde, la construcción de infraestructura, los métodos de almacenamiento y exportación, entre otros.
- ***Agua Desalinizada.*** Como ya se mencionó en reiteradas ocasiones, Chile posee escasez de agua, y el proceso de hidrógeno verde requiere utilizar agua dulce, es por eso que nace la alternativa de desalinizar agua, lo cual se realiza

actualmente para otros procesos, en específico de minería. Sin embargo, si la demanda de hidrógeno aumenta, los desalinizadores actuales no darán abasto, por lo que es un tema que se debe tomar en consideración.

- **Infraestructura.** En Chile existen varios proyectos para la producción de hidrógeno verde, sin embargo, si la demanda del hidrógeno verde sigue aumentando, la infraestructura que está en proceso de creación no será suficiente para producir la cantidad suficiente de este portador energético, por lo que deberá generar centros de producción más grande y con mayor capacidad.

Amenazas.

- ***Impacto Ambiental de la Desalinización.*** La desalinización de agua es un método utilizado para convertir agua salada a agua dulce. Para esta, se toman cantidades de agua del mar, se procesan y luego se desecha, por un lado, agua con sal, y por el otro, agua dulce. El proceso en sí es complicado, pues al tomar agua del mar se absorben organismos planctónicos, huevos de peces, larvas y más, que luego resultarán dañados por la succión y procesos del desalinizador. Posteriormente, al descargar el agua con sal al mar, existe mucha flora marina que no sobrevive a las grandes cantidades de sal, disminuyendo su abundancia con el tiempo (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2017). Debido a esto, Chile debe tener especial cuidado al querer producir hidrógeno verde con agua desalinizada, pues el proceso es dañino para la flora y fauna marina.
- ***Competencia Internacional.*** Chile es un país que está bien ubicado para la producción de hidrógeno verde, pues con su grande potencial de producción de energía renovable, es un candidato excelente para la competencia internacional

en la industria del hidrógeno, sin embargo, este país no es el único que posee ventajas para la competencia internacional. Es por esto que Chile debe actuar inmediatamente, avanzar en investigación y desarrollo, y generar infraestructura para la producción y exportación de hidrógeno verde, así se podrá posicionar como pionero en esta industria.

- ***Volatilidad de Mercado.*** De acuerdo con la figura 8, el futuro del mercado del hidrógeno verde aún no está definido, pues en el mejor de los casos, puede que exista un alto crecimiento de la demanda de este portador energético, y en el peor de estos, puede que la demanda se mantenga similar a la existente. Chile debe estar preparado para ambos casos, debido a que en el caso de que no exista un alto crecimiento de la demanda, y Chile posea toda la estructura necesaria para esto, las inversiones realizadas serán inútiles. En caso contrario, si Chile no posee infraestructura necesaria para una alta demanda, y la hay, se perderán los ingresos, que son vitales para que la industria crezca en el país.
- ***Regulaciones:*** Si bien el hidrógeno verde es una energía limpia, el proceso de desalinización, como ya se mencionó, posee desafíos no menores respecto a las consecuencias de la salmuera, por lo que puede existir regulaciones al respecto a esto, limitando la producción de hidrógeno verde en el país.

Tabla Resumen Chile y Australia

A continuación, se presentará una tabla comparativa que resume los análisis PESTA y FODA, con el propósito de visualizar las diferencias y similitudes entre ambos países de manera clara y concisa.

Resumen PESTA.

Tabla 6: Resumen PESTA Chile – Australia.

PESTA	Australia	Chile
<i>Político</i>	Año 2019: Australia's National Hydrogen Strategy Subsidios: Proyectos e I+D Año 2024: Agencia de Protección Ambiental de Australia Alianzas y MOUs	Año 2020: Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde Subsidios: Proyectos e I+D Año 2024: Plan de acción de Hidrógeno Verde (2023-2030) Alianzas y MOUs
<i>Económico</i>	Inversiones Privadas Subsidios y Financiamiento Alto Costo Buen Exportador	Inversiones Privadas Subsidios y Financiamiento Alto Costo Buen Exportador
<i>Social</i>	Educación Comunitaria Uso de energía limpia Formación técnica Creación de Empleos	Capacitación comunidad Participación comunitaria Uso de energía limpia Formación técnica Creación de empleos
<i>Tecnológico</i>	CSIRO y NERA HESC y HyNet Alianzas y MOUs	Desarrollo de Desalinizadores Haru Oni e HyEx Alianzas y MOUs

<i>Ambiental</i>	Acuerdo de París	Acuerdo de París
	Escasez de Agua	Escasez de Agua
	Alto uso de energías renovables	Alto uso de energías renovables
	Plan de Reducción de	Ley Marco del Cambio
	Emisiones a Largo Plazo	Climático
		Cierre de centrales a carbón

Fuente: Elaboración propia.

En el ámbito político, ambos países construyeron una estrategia nacional para el hidrógeno verde, en la cual fijan objetivos a mediano y largo plazo en la industria del hidrógeno. Sin embargo, Chile fue un poco más allá y elaboró el Plan de acción de hidrógeno verde, en el que fija objetivos a corto plazo en la industria. Además, ambos países poseen subsidios entregados por el Gobierno para investigaciones y para proyectos relacionados con el hidrógeno, y fijaron alianzas estratégicas y memorandos de entendimiento (MOUs) con otros países, con el propósito de trabajar juntos en el mercado del hidrógeno. Finalmente, Australia el año 2024 creó la Agencia de Protección Ambiental, la que está dirigida a regular y supervisar las actividades que puedan afectar el medioambiente.

En lo económico, Chile y Australia son bastante similares, pues ambos países poseen inversiones privadas, subsidios y financiamiento para los proyectos de hidrógeno verde, además de poseer un alto costo en la producción actual y ser buenos exportadores de materia prima, por lo que económicamente en la industria no hay mayores diferencias.

En el ámbito social, Australia planea capacitar a la comunidad australiana del porqué el hidrógeno verde es una buena alternativa como portador de energía, mientras que Chile pretende capacitarla y, además, dejar participar a la gente en el proceso de esto. Ambos países

poseerán capacitación técnica para la comunidad, y junto con esto, la creación de nuevos empleos en la industria. Además, el uso doméstico de la energía limpia beneficiará a la población de ambos países.

Por el lado tecnológico, Australia posee asociaciones dedicadas a la investigación y desarrollo tanto de tecnologías para el hidrógeno verde como para otras tecnologías. Chile, por el momento, se está dedicando al desarrollo de desalinizadores, debido a la escasez de agua del país. Asimismo, ambos países poseen proyectos que están relacionados al hidrógeno verde, sin embargo, Australia posee uno que ya está en funcionamiento (HESC), por lo que, en este ámbito, iría más avanzado que Chile. Finalmente, ambos países poseen Alianzas y MOUs con otros países, lo que les permite colaborar en conjunto con estos, y avanzar tecnológicamente.

Por último, en el ámbito ambiental, Chile y Australia firmaron el Acuerdo de París, el cual pretende limitar la temperatura global a un máximo de 2°C, incentivando a los países a utilizar menos combustibles fósiles. Por otro lado, ambos países poseen un alto consumo de energías renovables, dado a la geografía de estos y además, poseen escasez de agua, lo que obliga a utilizar desalinizadores para el proceso. Asimismo, poseen iniciativas que abarcan la carbono neutralidad al año 2050, en Australia se encuentra el “Plan de Reducción de Emisiones a Largo Plazo”, mientras que en Chile se encuentra la “Ley Marco del Cambio Climático”. Finalmente, Chile posee planes de cerrar centrales a carbón en función de contaminar menos, mientras que el Gobierno de Australia no habla de esto.

Resumen FODA.

Tabla 7: Resumen FODA Chile – Australia.

FODA	Australia	Chile
<i>Fortalezas</i>	Abundantes recursos naturales Captura y almacenamiento de combustibles fósiles y carbono Apoyo del Gobierno hacia las industrias I+D Experiencia Acuerdos internacionales Educación y capacitación	Abundantes recursos naturales Compromiso Gubernamental Infraestructura de Exportación Subsidios y Apoyo Financiero Acuerdos Internacionales
<i>Oportunidades</i>	Creciente Demanda Creación de Empleos Uso doméstico Posicionamiento en la Industria Baja de Costos	Creciente Demanda Liderazgo en Exportación Atracción de Inversiones Extranjeras Innovación y Desarrollo Tecnológico Baja de Costos Beneficios sociales
<i>Debilidades</i>	Costo	Costo

	Agua Desalinizada Dependencia Tecnológica Infraestructura	Dependencia de Subsidios Dependencia Tecnológica Agua Desalinizada Infraestructura
<i>Amenazas</i>	Impacto ambiental de la desalinización Competencia Internacional Volatilidad de Mercado Regulaciones	Impacto ambiental de la desalinización Competencia Internacional Volatilidad de Mercado Regulaciones

Fuente: Elaboración propia.

Si se analiza el FODA de ambos países, se puede ver que en general son bastantes similares, sin embargo, se presentan diferencias que serán descritas a continuación.

En el ámbito de fortalezas, ambos países poseen abundantes recursos naturales, lo que los hace idóneos para producir hidrógeno verde. Australia presenta una fortaleza que Chile no, y es que posee la facultad de capturar almacenar combustibles fósiles y carbono en distintos métodos, lo que les permite producir hidrógeno limpio, sin la dependencia de tecnologías que se presentan hoy en día sobre el hidrógeno verde. Asimismo, ambos países presentan experiencia e infraestructura para la exportación de bienes, por lo que no les será muy difícil ser exportadores principales de hidrógeno verde. Chile posee un gran compromiso gubernamental en favor de la industria, entregando subsidios y apoyo financiero para que la industria crezca, mientras que Australia posee un gran apoyo del gobierno hacia las inversiones privadas en la industria del hidrógeno. Se debe mencionar que una gran fortaleza que Australia posee es la investigación y desarrollo, pues posee

asociaciones directamente dedicadas a esto. Finalmente, ambos países poseen acuerdos internacionales que son útiles para poder colaborar en conjunto.

Por el lado de las oportunidades que se dan dentro de la industria, si crece la demanda del hidrógeno, esto será beneficioso para ambos países, pues la venta sería mayor y se podrían posicionar en la industria y liderar las exportaciones del hidrógeno. Chile, por otro lado, posee la oportunidad de atraer inversiones extranjeras en mayor cantidad y avanzar como país en la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías útiles para el hidrógeno verde. En la industria del hidrógeno verde, según maduren las tecnologías de producción del hidrógeno, los precios de este también deberán disminuir, lo que resulta en una gran oportunidad para ambos países. Finalmente, ambos países podrán tener la ventaja de que la comunidad pueda utilizar el hidrógeno en su vida diaria, lo que les permitiría poseer una vida más “limpia”, además, la industria generará empleos que servirán para la comunidad de estos países.

Por el lado de las debilidades, ambos países presentan debilidades similares, sin embargo, Chile posee más que Australia.

El costo actual del hidrógeno verde es muy alto, lo que perjudica a ambos países, pues no compite con las fuentes de energías que se utilizan actualmente. Además, la dependencia que se tiene sobre la tecnología para poder avanzar en esta industria es una debilidad que no permite que el mercado avance. La falta de infraestructura también es una de estas, pues si aumenta la demanda, no existirá infraestructura suficiente para la producción de hidrógeno. Además, Chile y Australia poseen escasez de agua, por lo que el agua necesaria para la producción de hidrógeno presenta un desafío y una debilidad, debido a que posee un costo extra la producción de este portador de energía. Por otro lado, Chile presenta como debilidad la dependencia de subsidios. Los subsidios

que ha dado el Gobierno de Chile son altos, pero si estos llegaran a dejar de darse, no se sabe si los proyectos seguirían en pie, por lo que se necesitan subsidios para avanzar con los proyectos.

Finalmente, para ambos países representa una amenaza el impacto ambiental de la desalinización, pues al arrojar salmuera al mar, esto afecta la flora y fauna marina, además de la cantidad de electricidad que se utiliza para el proceso. Para Australia y Chile representan amenazas la competencia internacional, pues además de estos dos países idóneos para la producción de hidrógeno verde, existen más países que lo son y que podrían ser ganadores de esta competencia. La volatilidad del mercado podría ser una amenaza debido a que, si la demanda aumenta en reducida cantidad, y los países están preparados para una alta demanda, se perdería la infraestructura construida para este objetivos. Por último, una amenaza adicional a la industria de ambos países serían las regulaciones impuestas por los Gobiernos, ya sea por la desalinización, por algún impuesto a la exportación, entre otros.

En conclusión, Chile y Australia poseen un macroentorno y microentorno similar, sin embargo, Chile posee mayores desafíos en la investigación y desarrollo y en el desarrollo de proyectos pilotos.

Mejores Prácticas de Distribución De Australia

Del análisis anterior, se pueden observar y estudiar las distintas buenas prácticas que posee Australia en términos de distribución y exportación del hidrógeno verde. Estas se detallarán a continuación:

Investigación y Desarrollo. Australia cuenta con diversas asociaciones dedicadas al estudio exhaustivo de la industria del hidrógeno verde, abarcando desde la infraestructura necesaria hasta los equipos involucrados en su producción, distribución y exportación. Estas organizaciones juegan un papel crucial en la investigación y desarrollo de este

portador energético, considerado fundamental en la transición hacia fuentes de energía más sostenibles.

Además, Australia posee múltiples proyectos destacados entre los que se encuentra el Australian Renewable Energy Hub, una iniciativa emblemática donde se analizan en profundidad aspectos críticos como el transporte y el almacenamiento del hidrógeno. Este proyecto es un ejemplo claro del compromiso de Australia con el liderazgo en la innovación energética a nivel mundial, con miras a posicionarse como un exportador clave de hidrógeno verde en el mercado global.

Asociaciones con Distintos Países. Australia ha forjado una serie de alianzas estratégicas y memorandos de entendimiento (MOUs) con diversos países alrededor del mundo, con el objetivo de impulsar la colaboración en la investigación y el desarrollo de tecnologías y aplicaciones relacionadas con el hidrógeno verde. Estas asociaciones no solo permiten a Australia acceder a una vasta cantidad de conocimientos técnicos y científicos sobre la producción de hidrógeno verde, sino que también facilitan un intercambio valioso de experiencias y mejores prácticas en su distribución y exportación. A través de estas colaboraciones internacionales, Australia busca consolidarse como un líder global en la transición hacia energías limpias, optimizando su capacidad para exportar hidrógeno verde de manera eficiente y sostenible a mercados internacionales.

Incentivos Fiscales. Australia se ha enfocado en entregar subsidios y financiamiento para empresas que investiguen y que generen proyectos relacionados con el hidrógeno verde, entre esta investigación, uno de los principales temas es la distribución y exportación del hidrógeno, cómo esta se realizará y que infraestructura existe. En Australia actualmente existe infraestructura para distribuir amoníaco, por lo que esta es una gran alternativa para

el transporte de hidrógeno verde (ANZ, s.f), sin embargo, la elección del método dependerá del tipo de proyecto y a las tecnologías que este posea.

Proyectos Piloto. Actualmente, Australia posee el proyecto piloto Hydrogen Energy Supply Chain, ya descrito anteriormente. Como ya es de conocimiento, este proyecto no transporta hidrógeno verde, pero sí hidrógeno limpio. Este proyecto exporta hidrógeno a grandes escalas internacionalmente, y lo hace mediante barco, almacenado como hidrógeno líquido. A este barco se le llama “ The Suiso Frontier” y es el proyecto más avanzado y escalable que presenta Australia actualmente. Este barco es tan grande como un campo de fútbol y posee un tonelaje bruto de 8.000 toneladas. La pieza central del barco es su tanque de almacenamiento de hidrógeno líquido y mantiene el hidrógeno a temperatura criogénica (HESC, s.f)

Todas estas buenas prácticas que posee actualmente Australia permitirán que, en un futuro, este país pueda conseguir ser uno de los principales competidores en la industria del hidrógeno verde, y uno de los exportadores más confiables del mercado.

Selección y Clasificación de los Métodos de Almacenamiento y Distribución

La selección y clasificación de los métodos de almacenamiento y distribución óptimos para Chile es una de las decisiones más difíciles e importantes para el país, pues de escoger un método equivocado, Chile se podría enfrentar tanto a pérdidas económicas como a peligros para las personas que trasladan el hidrógeno.

Es por esto que la selección del método debe ser cuidadosa y detallada. Teniendo en cuenta la madurez tecnológica, las características técnicas y los métodos de distribución mejor alineados con los métodos de almacenamiento.

La clasificación de diversos métodos de almacenamiento ya se ha hecho anteriormente. Los métodos existentes son los siguientes:

- Hidrógeno Comprimido (CH₂)
- Hidrógeno Líquido (LH₂)
- Portadores Orgánicos Líquidos de Hidrógeno (LOHC)
- Amoníaco (NH₃)
- Mezclar hidrógeno en Gaseoductos Naturales

En este estudio, no es pertinente estudiar el Mezclar Hidrógeno en Gaseoductos Naturales, ya que como ya se ha mencionado, Chile sólo podría exportar hidrógeno verde hacia Argentina, y en este estudio se debe tener en consideración países tanto dentro del continente como fuera de este.

Una vez eliminado este método de almacenamiento, quedan cuatro restantes. Se debe analizar qué métodos de almacenamiento son compatibles con los métodos de distribución existentes. Se debe recordar que se quiere exportar internacionalmente el hidrógeno verde, lo que implica que el método de distribución debe ser a largas distancias.

Si se analiza la tabla 3, se logra analizar que el único método útil para transportar hidrógeno en más de 4.000 kilómetros es el barco, por lo que esta será la elección adecuada en términos de transporte. La figura 3 confirma esto, a grandes distancias, el método de transporte más adecuado es el barco. Además, según la tabla anteriormente mencionada, en barco se puede transportar el hidrógeno de dos formas: como hidrógeno líquido o como amoníaco.

Dado esto, los dos métodos de almacenamiento que se analizarán serán estos dos.

Para tomar la decisión de cuál de los dos escoger, se deberá analizar la madurez del proceso, de la tecnología, las características técnicas y los costos de transporte de ambos métodos.

Según la tabla 1, la madurez del proceso de conversión de hidrógeno líquido es alta en baja escala, y baja en gran escala, mientras que la del amoníaco siempre es alta. Ambos métodos poseen una alta madurez en almacenamiento en estanques. Por otro lado, la madurez del hidrógeno líquido en barco es baja, mientras que la del amoníaco es alta. La madurez de la reconversión de hidrógeno líquido a hidrógeno verde es alta, mientras que la del amoníaco es media. Finalmente, la madurez del proceso de integración a la cadena de valor es media/alta para el hidrógeno líquido y alta para el amoníaco.

Si se analiza la información entregada, se puede analizar que para el amoníaco la madurez de las tecnología y procesos es alta para todo, exceptuando la reconversión, en la que es media. Mientras que, para el hidrógeno líquido, es alta sólo en algunos casos. En la tabla 2, se pueden ver las características técnicas de ambos métodos de almacenamiento. De esta se puede analizar que ambos métodos son peligrosos, debido a la inflamabilidad principalmente. Asimismo, se puede observar que la energía requerida para la conversión y reconversión es de 25% a 35% en el caso del hidrógeno líquido, y para el amoníaco de 7% a 18% en la conversión y menos de 20% para la

reconversión. Esto nos da la idea de que el amoníaco necesita menos energía para convertirse y reconvertirse en hidrógeno verde que el hidrógeno líquido.

Finalmente, la tabla 4 muestra el precio por transportar una tonelada de hidrógeno por kilómetro, según el método de almacenamiento que se escoja. En esta tabla se puede observar que el costo de transportar una tonelada de hidrógeno líquido cada kilómetro es de \$0,09 USD, mientras que transportar una tonelada de amoníaco cada kilómetro es de \$0,03 USD. Siendo más económico el amoníaco que el hidrógeno líquido.

Al analizar los métodos de almacenamiento y distribución del hidrógeno verde para Chile, se evidencia que la decisión final debe ser cuidadosamente ponderada debido a las implicaciones económicas y de seguridad involucradas. De los métodos evaluados, la mejor opción es transportar el hidrógeno mediante barco, pues las distancias en general son largas debido a la posición geográfica de Chile. En base a esto, de los métodos de almacenamiento identificados, el amoníaco se presenta como la opción más ventajosa frente al hidrógeno líquido, gracias a su alta madurez tecnológica en casi todas las etapas del proceso, su menor requerimiento energético para la conversión y reconversión, y su menor costo de transporte por kilómetro. Estos factores hacen que el amoníaco sea el candidato más eficiente y económico para la exportación a largas distancias, lo cual es crucial para posicionar a Chile en el mercado internacional de hidrógeno verde.

Análisis del Mercado Global

Potencial Demanda de Hidrógeno Verde a Nivel Mundial

Uno de los aspectos más importantes en el mercado del hidrógeno verde es la demanda a la que este se enfrentará y los posibles escenarios que existen respecto a este. En la figura 7 se puede ver la demanda del hidrógeno y también, las posibles situaciones a las que se puede enfrentar. Como ya se mencionó anteriormente, lo ideal es enfrentarse a la situación “Cero Neto” pues es donde los países que exportan se beneficiarían más.

Respecto a la investigación realizada, y a cómo los países han reaccionado al cambio climático, esta autora cree que el escenario lógico sería el del “Cero Neto”, pues mundialmente se han establecido acuerdos, leyes y planes para mitigar los combustibles fósiles y poder avanzar a un mundo más sustentable. Debido a esto, será este el escenario que se estudie.

Según Gulli et al.(2024) se espera alcanzar una demanda de 585 Mton para el año 2050, y según la figura 7, el año 2025 la demanda es aproximadamente 20 Mton.

A continuación, se reconstruirá la línea de tendencia de la demanda del escenario “Cero Neto” teniendo en consideración que en la curva de la figura 7 se ven dos quiebres en la línea de la demanda, el primero en el año 2030, y el segundo en el año 2040 aproximadamente. Para esto, se utilizarán los valores de demanda de 60 Mton y 260 Mton respectivamente. En la figura 9 se puede ver el gráfico asociado a la demanda por año. Se considerará que el año 0 es el año 2025, mientras que el año 5 es el 2030, etcétera.

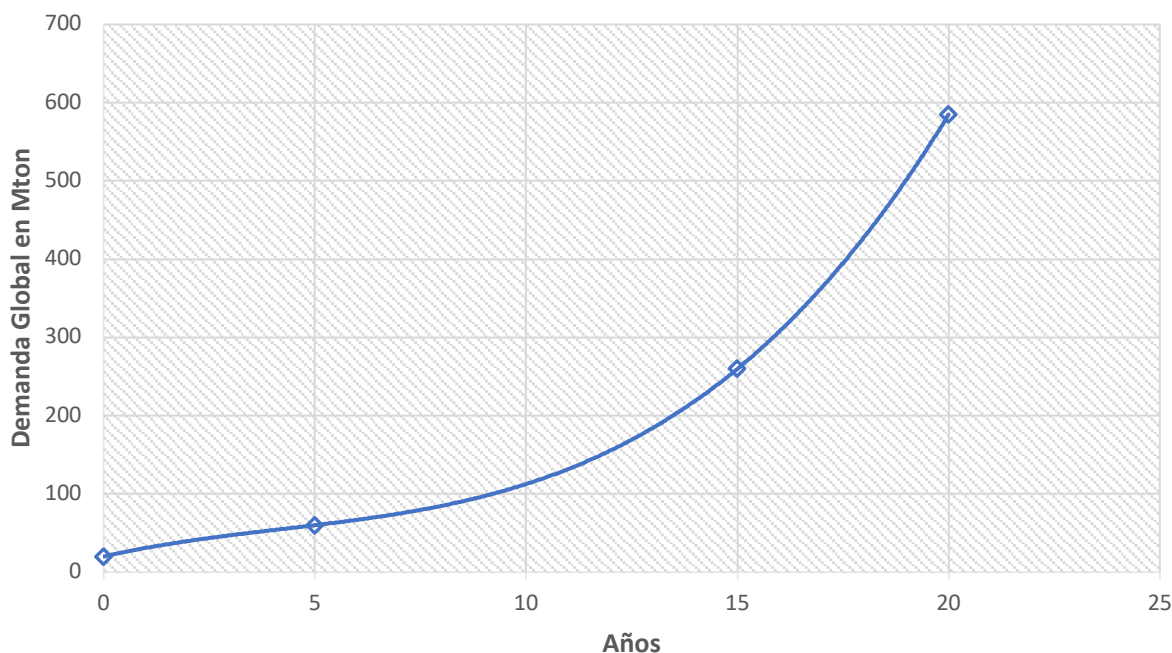


Figura 9: Estimación de la demanda global de hidrógeno verde en Mton por año, hasta el 2050. Elaboración propia en base a datos de Gulli et al..

Se debe destacar que este gráfico está hecho con los datos anteriormente mencionados, y es el mejor escenario posible del crecimiento de la demanda. La ecuación del gráfico se encontrará en Anexos 1.

Costos y Competitividad

Anteriormente, en la tabla 5, se pudo ver que los mayores competidores eran Australia, Estados Unidos, España y Canadá, pues son los países que más producción de hidrógeno acumularán para el año 2030.

Al ser estos países los principales competidores de Chile serán estos los costos que se analizarán a continuación:

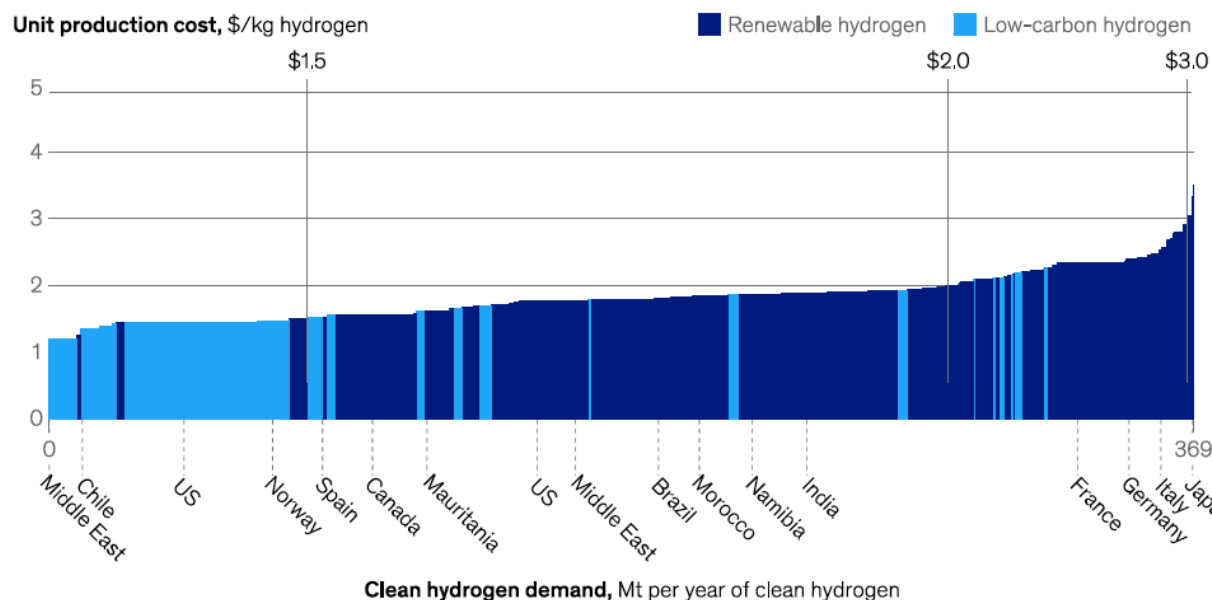


Figura 10: Costos por unidad de producción en \$/kg por demanda del hidrógeno limpio en Mt para el 2050.

Adaptado de Global Energy Perspective 2023: Hydrogen outlook, Gulli et al.,2024

Como se puede ver en la figura 10, Chile es uno de los pocos países que poseerá un costo menor a \$1,5 USD por kilogramo, con hidrógeno verde, mientras que la mayoría de los otros países que están por debajo de este rango poseen un costo menor en base a hidrógeno bajo en carbono. Posterior a Chile, se encuentra Estados Unidos con un costo menor a \$1,5 USD por kilogramo, sin embargo, con hidrógeno bajo en carbono. Luego, se encuentra España con un costo ligeramente más alto que \$1,5 USD, sin embargo, con hidrógeno bajo en carbono. Muy cercano a España se encuentra Canadá, con un costo similar al de España, sin embargo, Canadá posee este costo en base a hidrógeno verde. Un poco más lejos se encuentra nuevamente Estados Unidos, esta vez con hidrógeno verde y más costoso que los otros países mencionados. Australia no se encuentra en este gráfico, sin embargo, se proyecta que en 2050 tendrá un costo por kilogramo de aproximadamente \$1,39 USD por kilogramo, dejándolo más cercano a Chile que el resto de los países.

Toda esta baja de costos dependerá netamente de la baja de costos de la tecnología utilizada para la producción de hidrógeno.

Mercados Más Prometedores

En cuanto a qué países serán los principales consumidores de hidrógeno en un futuro, según Gulli et al. (2024) algunos países de Asia (China, Hong Kong y Taiwán) seguirán siendo uno de los primeros consumidores de hidrógeno, y se prevé que no producirá suficiente hidrógeno para satisfacer su demanda, por lo que recurrirá a otros países para comprar hidrógeno. Además, el estudio plantea que el 39% de la demanda de hidrógeno será llevada por la industria química, seguida de la de transportes. Además, se propone que el porcentaje de hidrógeno limpio que utilizarán estos países será de 82%. Posterior a estos países, se encuentra Estados Unidos, el segundo mayor consumidor de hidrógeno, que se proyecta un 100% de consumo de hidrógeno limpio, y se consumirá este mayormente en la industria de calefacción. A continuación de Estados Unidos, está Europa, con un consumo de 100% de hidrógeno limpio, y su mayor uso en la industria de aviación y marítima. Estos serán los tres países que se proyectan con un mayor consumo en el año 2050. A continuación, en la figura 12 se mostrará un resumen con la información de qué países serán los que mayor demanda poseerán, en qué industrias será y qué porcentaje de hidrógeno limpio se utilizará:

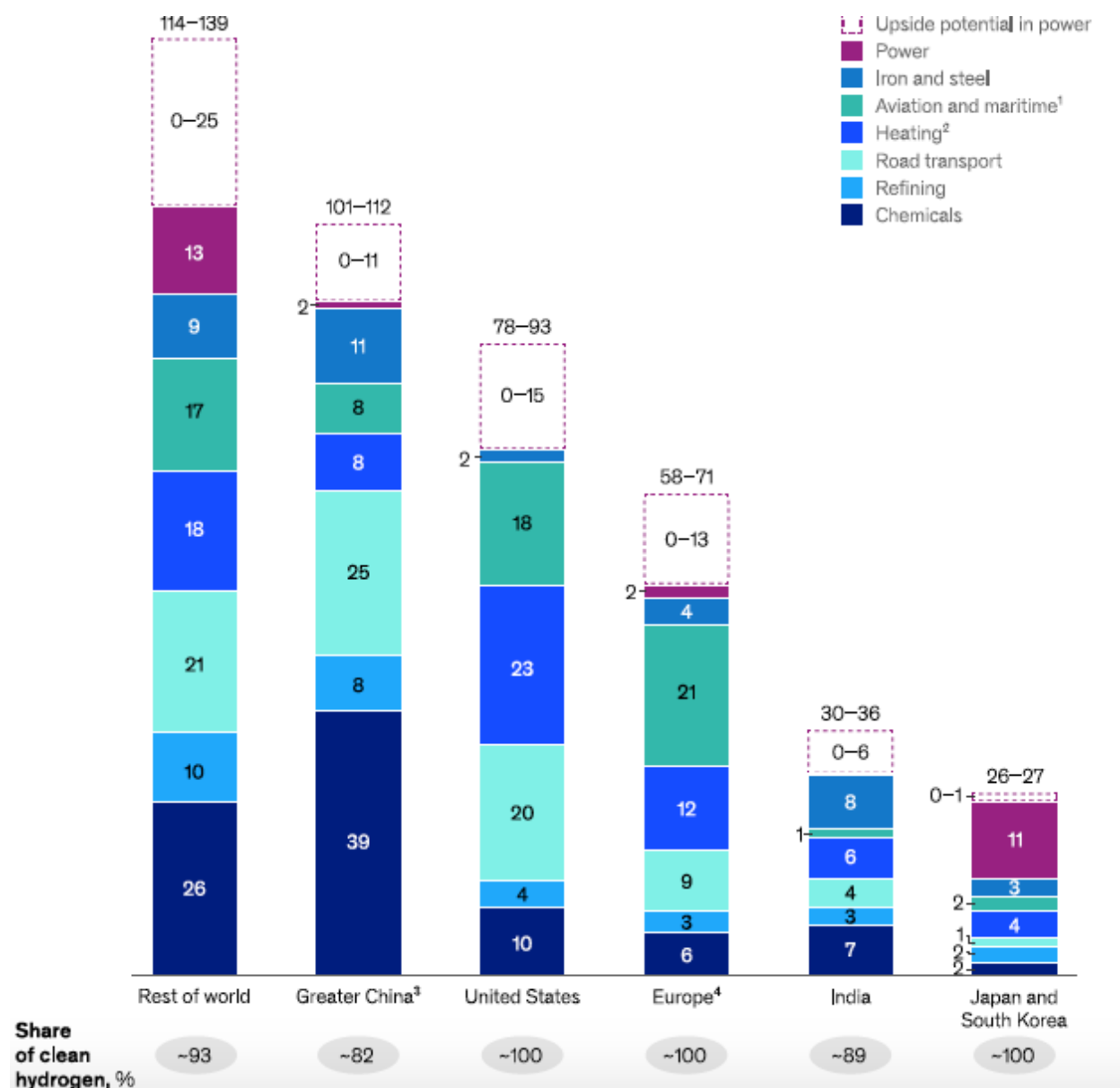


Figura 12: Para 2050, se proyecta que la región de Asia-Pacífico (APAC) tendrá la mayor demanda de hidrógeno, impulsada por la demanda en el sector químico, especialmente en China e India. Adaptado de Perspectiva energética mundial 2023: perspectivas del hidrógeno, Gulli et al., 2024

Tal como se puede ver en la figura 12, del mundo la industria que más consumirá hidrógeno será la química, seguida por la de transporte.

Tecnologías Relacionadas con el Almacenamiento de Amoniac

En cuanto al almacenamiento de amoniac, según Santodomingo (2024, p. 7-10) existen diferentes formas de hacerlo, entre ellas se encuentran:

Almacenamiento Semi-Refrigerado

Estos sistemas permiten el almacenamiento de amoniac líquido refrigerado a baja presión en un contenedor aislado. El amoniac se mantiene a una temperatura de alrededor de 0°C y una presión de 3 a 4 bar. El almacenamiento de este se realiza usualmente a través de esferas y puede contener hasta 3.000 toneladas. Este sistema es relativamente económico, pues el amoniac gaseoso se comprime y luego se licúa por enfriamiento de agua, luego se devuelve al tanque.

Almacenamiento a Baja Temperatura

Este sistema permite el almacenamiento del amoniac líquido a una presión ligeramente mayor a la presión atmosférica y a -33°C. Este se almacena en tanques refrigerados a baja temperatura. Estos tanques son cilindros aislados que pueden almacenar hasta 50.000 toneladas de amoniac y se enfrían mediante un proceso de compresión de dos etapas.

El sistema de refrigeración mantiene la temperatura baja para que el amoniac permanezca líquido. Los tanques pueden ser aislados de una pared o de dos paredes, en donde la segunda pared protege el gas en caso de fallar el primer tanque. Entre ambos tanques existen materiales aislantes. Aunque estos tanques son más caros, son más seguros y tienen menores costos de mantención a largo plazo.

El almacenamiento en tanques también implica riesgos, como la corrosión bajo tensión que puede producir grietas en los tanques. Este riesgo se controla utilizando materiales especiales y manteniendo la temperatura adecuada.

Almacenamiento en Estado Sólido

Este método de almacenamiento es una alternativa prometedora en cuanto al resto. En este, el amoníaco se almacena en materiales sólidos que liberan el amoníaco sólo cuando se calientan o despresurizan, lo que lo hace más seguro.

Los haluros metálicos son los materiales que más se han investigado con este propósito. Estos almacenan el amoníaco a temperatura ambiente y lo almacenan en forma de sales. La configuración más práctica de este tipo de almacenamiento consiste en variados cilindros de 0,5 a 1,0 metros de diámetro y algunos metros de altura.

A pesar de su potencial, el método aún necesita mejoras para ser viable comercialmente.

Almacenamiento a Alta Presión

Este tipo de almacenamiento conserva el amoníaco líquido a temperatura ambiente. Este se puede almacenar en cilindros horizontales para cantidades mayores o igual a 150 toneladas, o en esferas grandes para cantidades de hasta 1.500 toneladas. Los recipientes cilíndricos están contruidos para soportar presiones de hasta 25 bar, mientras que los recipientes esféricos sólo alcanzan los 16 bar, por lo que, en climas más cálidos, estos necesitan un mayor recubrimiento con aislamiento o refrigeración.

En general, el almacenamiento a presión se utiliza para almacenar pequeñas cantidades. El acero utilizado debe ser específico para esto, pues puede agrietarse bajo tensión si no se controla la cantidad de agua en el amoníaco, para esto se suele conservar un 0,2% de agua en este.

A continuación, se mostrará una tabla que resumirá los aspectos más importantes de cada método de almacenamiento:

Tabla 8: Resumen aspectos importantes de cada método de almacenamiento de amoníaco.

Tipo	Nivel de Madurez (TRL)	Presión típica, bar	Temperatura diseñada, °C	Capacidad, t amoníaco
Almacenamiento a Alta Presión	9	16-18	20-25	<270 o <1.500
Almacenamiento Semi- Refrigerado	9	3-5	0	450-2.700
Almacenamiento a Baja Temperatura	9	1.1-1.2	-33	<50.000
Almacenamiento en Estado Sólido	3-4	1-30	20-250	-

Fuente: Santodomingo, (2024) , Ammonia Transport & Storage.

En primer lugar, se debe mencionar que el Nivel de Madurez Tecnológica se mide en una escala de TRL, donde 1 es una madurez tecnológica baja y 10 es el nivel más alto de madurez. En este caso, el almacenamiento en estado sólido es el único tipo de almacenamiento con baja madurez, esto es debido a que aún se deben realizar investigaciones para saber si es realmente útil en la industria. Por otro lado, el resto de los almacenamientos poseen un TRL es bastante alto. Debido a esto, es que se descartará el almacenamiento en estado sólido de la investigación.

Por el lado de la presión, lo que esto afecta es la temperatura, por lo que, a mayor presión, mayor temperatura. Debido a esto es que una presión de 1.1 bar posee una temperatura de diseño de -33°C y una presión de 18 bar posee una temperatura de diseño de 25°C.

Considerando la cantidad de amoniaco que se quiere exportar, el método de almacenamiento se escogerá por la capacidad que se puede almacenar. Es por esto que se escogerá el método de almacenamiento a baja temperatura.

Tanques de Almacenamiento

Según Pattabathula et al. (s.f) existen principalmente dos tanques de almacenamiento para el amoniaco líquido a presión atmosférica los *tanques de acero de pared simple con aislamiento externo*, y los *tanques de acero de paredes dobles*. Además, dentro de esta última categoría, existen dos categorías más, los *tanques de doble pared y doble integridad con aislamiento en el espacio anular* y los *tanques de doble pared y doble integridad con aislamiento externo*. A los tanques con doble pared y doble integridad se les asigna la sigla DWDI por su nombre en inglés.

A continuación, se mostrará una figura con los cuatro tipos de tanques ya mencionados:

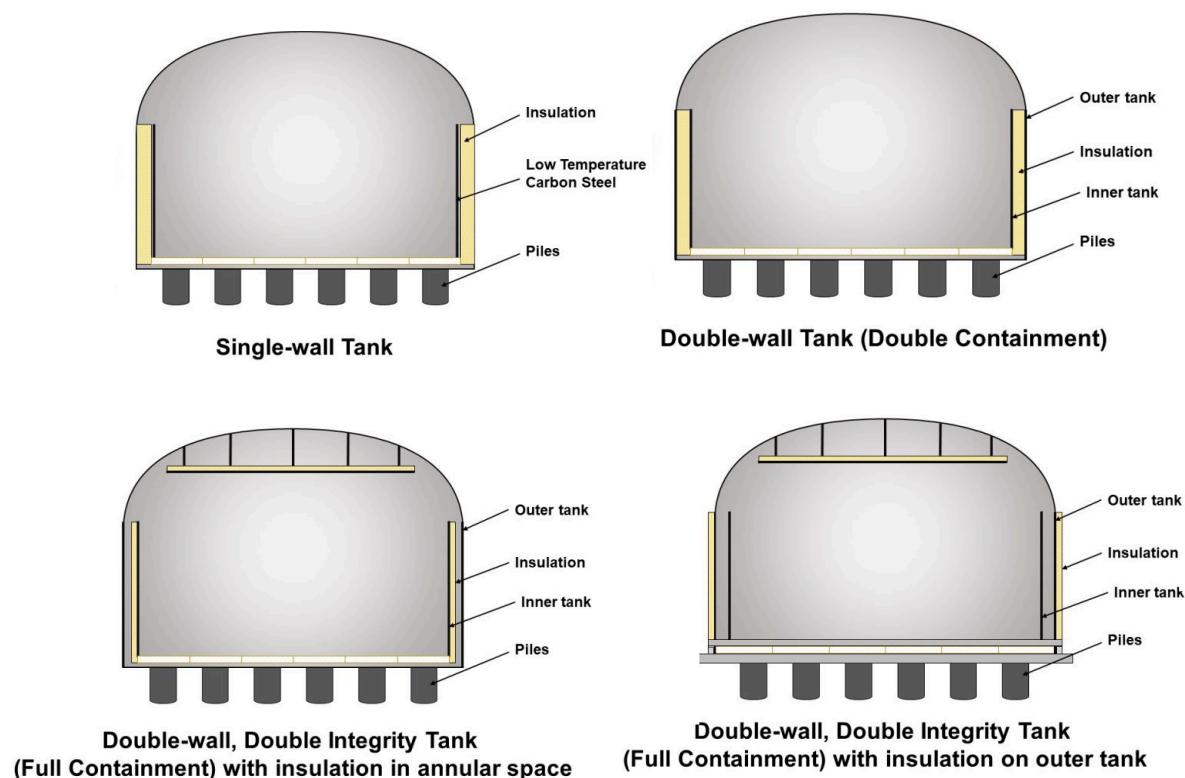


Figura 11: Tipos de tanques de almacenamiento para amoniaco líquido. Adaptado Ammonia Storage Tanks, Pattabathula et al., s.f.

En la figura 11, se puede observar que los tanques están sostenidos por pilotes (piles) que es lo generalmente aceptado por estos tanques.

Se debe hacer mención a que si falla el tanque interior de los DWDI con aislamiento en el espacio anular, este debe ser desmantelado ya que su tanque exterior no está aislado, mientras que si el tanque interior de los DWDI con aislamiento externo falla, este puede funcionar durante más tiempo. Es por esto que estos últimos son más caros.

En el pasado, muchas empresas construían tanques de pared simple, sin embargo, por temas de seguridad, se empezó a recomendar utilizar los DWDI con aislamiento exterior para el almacenamiento, para disminuir los riesgos.

De lo descrito anteriormente, se debe decir que si bien los tanques de doble pared presentan una mayor seguridad y menor riesgo, no implica que los de pared simple no sean seguros, además de ser más económicos. Para que los tanques se mantengan apropiadamente, se deben realizar las mantenciones y mantenerlos hasta que su vida útil se termine.

Flujo de Caja

A continuación, se realizará un análisis económico de la viabilidad de transportar hidrógeno verde mediante amoniaco en Chile. Para esto, se realizará un flujo de caja en el que se considerarán todos los ingresos, costos y otras variables.

El objetivo de realizar un flujo de caja desde el año 2030, es saber la rentabilidad de la distribución del amoniaco hasta el 2040, considerando una producción constante de este. Se realizará el estudio económico a partir de diversos supuestos, y cálculos que se detallarán a continuación.

Supuestos

- De la producción total producida por el proyecto Hyex para exportar al 2030, se considera que la mitad es para consumo interno de la empresa, y el resto es con fines de exportación
- Se considerará que la cantidad exportada se mantendrá constante durante los años, debido a que será la producción máxima a la que se podrá llegar.
- Se considera que los costos serán constantes a través de los años.
- Se considera que el valor de salvamento de los activos es 0.
- Se hace el supuesto de que la capacidad del barco es de máximo 25 personas.
- Se asume un periodo de desfase de 3 meses.
- Se considera que la carga saldrá del Puerto de San Antonio.
- Se considerará un horizonte de planificación desde el 2030 hasta el 2040.
- El Gobierno financiará el 50% de la inversión inicial del proyecto, y dará un subsidio mensual a definir.

Ingresos

Para estimar la producción de la planta para el año 2030, se utilizó como referencia la producción del proyecto “Hyex” (s.f), el cual estima producir 700.000 toneladas de amoniaco para ese año. Como ya se mencionó, sólo se considerará el 50% para la exportación, por lo que la cantidad exportada se calcularía como:

$$700.000 \text{ ton} * 0,5 = 350.000 \text{ ton} \quad (1)$$

Ecuación 1: Cantidad de amoniaco verde a exportar en 2030.

Por lo tanto, a 2030 se estarían exportando alrededor de 350.000.000 kg.

Con respecto al precio al que se transa este amoniaco en el mercado, en primer lugar, se observaron los valores de mercado del amoniaco verde desde la fuente S&P Global (2024), que se pueden observar a continuación en la figura 13:

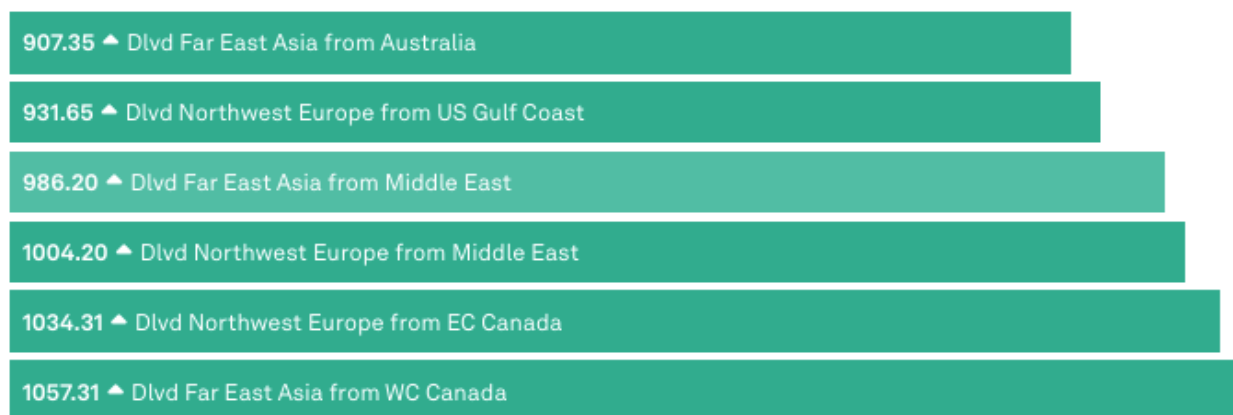


Figura 13: Precios de amoniaco verde transado en el mercado a 2024, en toneladas métricas. Adaptado de Platt's Ammonia Price Chart, S&P Global, 2024.

Con estos valores, que se encuentran en precio por tonelada, se realizó un promedio, y se obtuvo el precio del amoniaco verde, el cual es de $\$0,987 \frac{USD}{kg}$.

Para obtener los ingresos, se multiplicó el precio del amoniaco verde por la cantidad de amoniaco, y se obtuvo que los ingresos serán de \$345.392.833 USD anuales.

Activos

Barcos.

Como ya se mencionó anteriormente, la mejor manera de transportar amoníaco a largas distancias es mediante barcos. En este contexto, se utilizarán los Very Large Ammonia Carriers, barcos especializados para transportar amoníaco en grandes cantidades. Según Hine et al. (2024) cada barco cuesta alrededor de \$120.000.000 USD y pueden transportar entre 80.000 y 90.000 m^3 de amoníaco.

Para saber a cuántos kg equivale esa cantidad, se utiliza la densidad del amoníaco, que es $0,73 \frac{kg}{m^3}$. Al multiplicar ambos números, la capacidad total de amoníaco del barco es de 69.350 kg. Con este valor, se puede calcular la cantidad de viajes que se deben hacer, considerando el amoníaco total en kg que será exportado, y la capacidad del barco en kg:

$$\frac{350.000.000 \text{ kg}}{69.350 \text{ kg}} = 5.047 \text{ viajes.} \quad (2)$$

Ecuación 2: Valor total de viajes que se necesitan para exportar todo el amoníaco verde

Por otro lado, se considera que los días que un barco está en viaje, son el promedio de días desde Chile a China, con los días que tarda un barco de Chile a Estados Unidos, ya que ambos países serán los que más consuman hidrógeno. Desde Chile a China son 36 días en barco, mientras que desde Chile a Estados Unidos son 15 días, por lo que, en promedio, un barco se demora 25,5 días en un viaje. Con este dato, se puede calcular la cantidad máxima de viajes que puede realizar un barco. El cálculo considera los 365 días del año y se detalla a continuación:

$$\frac{365 \text{ días}}{25,5 \text{ días}} = 14 \frac{\text{viajes}}{\text{barco}} \quad (3)$$

Ecuación 3: Cantidad de viajes que puede realizar cada barco en un año.

De esta forma, se puede calcular la cantidad de barcos necesarios para trasladar la cantidad de amoníaco total a ofrecer, considerando la cantidad de viajes y los viajes por barco, de la siguiente forma:

$$\frac{5.047 \text{ viajes}}{14 \frac{\text{viajes}}{\text{barco}}} = 361 \text{ barcos.} \quad (4)$$

Ecuación 4: Cantidad de barcos necesarios para transportar el total de amoníaco

Con este dato, se puede obtener el costo total de este activo, que en total sería:

$$120.000.000 \text{ USD} * 361 = 43.320.000.000 \text{ USD} \quad (5)$$

Ecuación 5: Costo total de barcos

Tanques.

Se utilizará un modelo de estanque que posee una capacidad de 150 m^3 y un precio de 100.000 USD. Con estos datos se puede obtener la cantidad de tanques que pueden ir por barco. Se utilizará la capacidad del barco para este propósito.

$$\frac{95.000 \text{ m}^3}{150 \text{ m}^3} = 633 \text{ tanques} \quad (6)$$

Ecuación 6: Cantidad total de tanques para cada barco

La cantidad total de tanques será la cantidad de tanques que contiene un barco, por la cantidad de barcos, es decir, 228.513 tanques.

Con este valor, se puede calcular el costo total de tanques, que será el precio de cada tanque por la cantidad total de tanques:

$$228.513 * 100.000 \text{ USD} = 22.851.300.000 \text{ USD} \quad (7)$$

Ecuación 7: Costo total de tanques

Depreciación de Activos

Para cada activo se calculó la depreciación de estos, asumiendo un valor de salvamento igual a 0.

Barcos.

Para los barcos, se obtuvo su vida útil desde el SII (s.f), que es de 15 años. Por lo que, para calcular el costo de depreciación, se dividió el total de costos de los barcos por su vida útil, como se detalla a continuación:

$$\frac{43.320.000.000 \text{ USD}}{15} = 2.888.000 \text{ USD} \quad (8)$$

Ecuación 8: Total depreciación barcos.

Tanques.

En el caso de los tanques, según Eetrucks (s.f) la vida útil de los tanques es de 20 años. Por lo cual la depreciación de los tanques se puede calcular como:

$$\frac{22.851.300.000 \text{ USD}}{20} = 1.142.565.000 \quad (9)$$

Ecuación 9: Total depreciación tanques.

Costos Operacionales

Combustible.

Según Bialystocki y Konovessi (2016, p.163), se puede estimar el consumo de diésel de un barco mediante la siguiente ecuación:

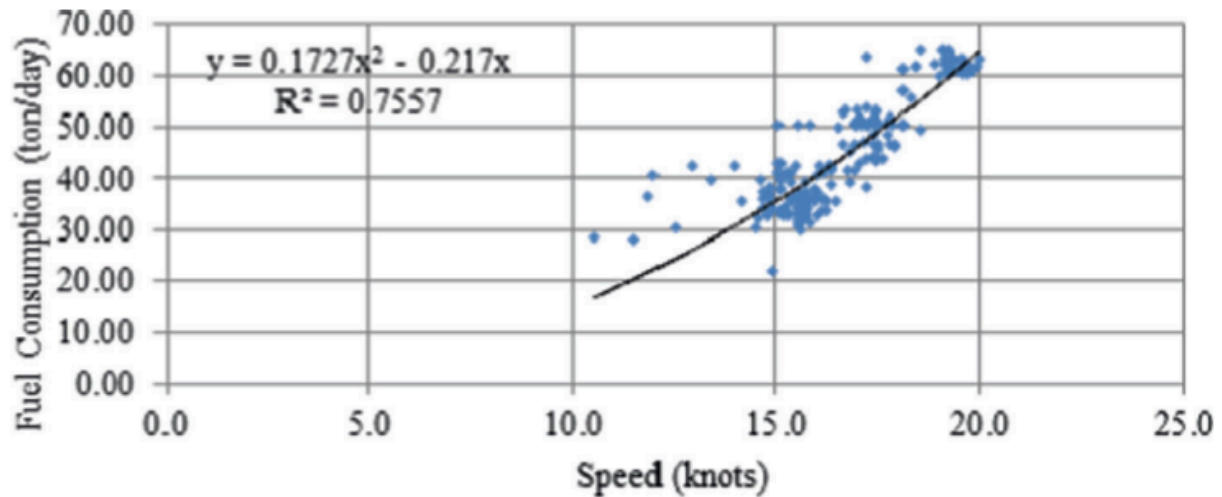


Figura 14: Consumo de combustible de un barco por velocidad en nudos. Adaptado de On the estimation of ship's fuel consumption and speed curve: A statistical approach, Bialystockki y Konovessiss, 2016.

Según Seo et al., la velocidad en nudos de un barco que almacena amoníaco es de 14,8 nudos. Con estos datos, se puede calcular el consumo de combustible en toneladas por día a través de la siguiente ecuación:

$$\text{Consumo} = 0,1727 * 14,8^2 - 0,217 * 14,8. \quad (10)$$

Ecuación 10: Consumo en toneladas por día de un barco que almacena amoníaco

Si además este valor se multiplica por mil para obtenerlo en kilogramos, la cantidad de combustible que utiliza un barco es de $263.657 \frac{kg}{día}$.

Según Centramar (s.f), la mayoría de los barcos poseen motores diésel, por lo que será este combustible el que se utilizará. Según Bussines Analytiq (s.f) el precio del diésel por kilogramo es de \$1 USD, por lo que el consumo total de un barco será de:

$$263.657 \frac{kg}{día} * 1 \frac{USD}{kg} = 263.657 \frac{USD}{día} \quad (11)$$

Ecuación 11: Consumo de combustible de un barco por día

Ahora, si se quiere saber el consumo total de los barcos, este valor se debe multiplicar por la cantidad de días promedio de un viaje, y por la cantidad total viajes que se harán:

$$263.657 \frac{USD}{día} * 5.047 * 25,5 \text{ días} = 32.645.224.965 \text{ USD.} \quad (12)$$

Ecuación 12: Costo total de combustible por cantidad total de barcos y cantidad total de viajes al año

Personal.

Se estima que dentro del barco se necesitarán al menos 5 personas que sean profesionales en el área de gases. Según Karunakaran (2017), cada profesional gana aproximadamente \$14.000 USD al mes.

Además, se necesitarán al menos 20 personas que sean profesionales en distintas áreas, ya sea en máquinas, cocineros, entre otros. Según Ziprecrutier (2024) un marino profesional posee un salario de \$36 USD por hora, es decir, si trabajan 8 horas al día, 30 días al mes, poseen un salario mensual de \$8.640 USD.

Según estos datos, se puede obtener el costo total del personal:

$$\begin{aligned} & 14.000 \frac{USD}{mes * persona} * 5 \text{ persona} + 8640 \frac{USD}{mes * persona} * 20 \text{ persona} \\ & = 242.800 \frac{USD}{mes} \quad (13) \end{aligned}$$

Ecuación 13: Costo total del personal por cada mes

Si todo el personal trabaja los doce meses del año, entonces el costo total del personal anual es:

$$2.913.600 \frac{USD}{mes} * 12 \text{ mes} = 2.913.600 \text{ USD.} \quad (14)$$

Ecuación 14: Costo total del personal por año

Seguridad.

La empresa debe financiar la seguridad de los pasajeros, cumpliendo con posibles normativas relacionadas al transporte de gases. En este contexto, se estimó el uso esencial de cuatro artículos indispensables para cada viaje; detectores de fugas, trajes antigases, máscara antigases y detectores de gases. Se considera recambio anual.

Se considerará una máscara y un traje para cada pasajero, cinco detectores de fugas y cinco detectores de gas. Los artículos poseen el valor unitario de \$640 USD, \$140 USD, \$100 USD y \$400 USD respectivamente. Con estos valores, se calcula el costo total en seguridad a continuación:

$$640 \text{ USD} * 5 + 140 \text{ USD} * 25 + 100 \text{ USD} * 25 + 400 \text{ USD} * 5 = 8.700 \text{ USD}. \quad (15)$$

Ecuación 15: Costo total de seguridad al año

Mantenciones.

Mantenición Barco. Según Battery Depot (2023) mantener un barco de 10 metros, cuesta un aproximado de \$4.100 USD. Además, Si (2024), un Very Large Ammonia Carrier mide un aproximado de 230 metros de largo. Es por esto y asumiendo que el aumento es lineal, se realiza una simple regla de tres, donde el valor final de mantención por barco es de \$94.300 USD anuales. Se debe considerar que en total son 361 barcos, por lo que el costo final de las mantenciones es:

$$94.300 \text{ USD} * 361 = 34.042.300 \text{ USD}. \quad (16)$$

Ecuación 16: Costo total de mantenciones del barco anuales

Mantenición Tanques. Estos tanques poseen la garantía y mantención por parte del proveedor.

Impuestos

Con respecto a los impuestos, existen varios de estos que podrían afectar a la exportación de amoniaco verde hacia otros países. Entre ellos se encuentran los Derechos Aduaneros, impuesto que se paga por exportar ciertos bienes hacia otros países. En este caso, se está estudiando la exportación hacia China y Estados Unidos, por lo que serán estos países los que se analizarán.

Con respecto a China, Chile posee un tratado de libre comercio (TLC) con este país, en el cual se fija un impuesto de 0% por la exportación de amoniaco. Con Estados Unidos sucede el mismo hecho, por lo que no se considerará este impuesto en el flujo de caja.

En cuanto al Impuesto Portuario, esta se calcula desde el lugar donde empezará el recorrido. En este caso, el recorrido empezará en San Antonio. Según Puerto San Antonio (2022), la tarifa cobrada a cada barco es de 0,594 por cada tonelada, por lo que el impuesto para cada barco será de:

$$0,594 \frac{USD}{ton} * 350.000 ton = 207.900 USD. \quad (17)$$

Ecuación 17: Impuesto Portuario por cada barco

Si además esto se multiplica por la cantidad total de barcos, el impuesto portuario total será de:

$$207.900 USD * 361 = 75.051.900 USD. \quad (18)$$

Ecuación 18: Impuesto Portuario total

Capital de Trabajo

Para obtener el capital de trabajo del proyecto, se utilizará el método de desfase.

Es decir, se necesitarán los costos totales del proyecto, es decir ingresos menos costos operacionales. Esto se realiza a continuación:

$$(345.392.833 - (32.645.224.965 + 2.913.600 + 8700 + 34.042.300)) \text{ USD}$$

$$= -32.336.796.731 \text{ USD. (19)}$$

Ecuación 19: Ingresos menos costos operacionales

A continuación, siguiendo el procedimiento del método de desfase, se debe multiplicar este valor por los meses de desfase, que en este caso son 3, y dividirlo por los 12 meses del año.

Se detalla este cálculo a continuación:

$$-32.336.796.731 \text{ USD} * \frac{3}{12} = -8.084.199.183 \text{ USD. (20)}$$

Ecuación 20: Capital de trabajo

Inversión

Se asume como inversión la compra de los activos, es decir, los barcos y tanques. La inversión final es de:

$$43.320.000.000 \text{ USD} + 22.851.300.000 \text{ USD} = 66.171.300.000 \text{ USD. (21)}$$

Ecuación 21: Inversión total

Tasa de Descuento

Para obtener la tasa de descuento, se utilizó el modelo CAPM, y se utilizó la ecuación que se presenta a continuación:

$$E(R_i) = R_f + \beta_i(E(R_m) - R_f) \quad (22)$$

Ecuación 22: Ecuación de CAPM para obtener la tasa de descuento

Donde $E(R_i)$ es la tasa de descuento, R_f es la tasa de interés libre de riesgo, β_i es la sensibilidad del mercado y $E(R_m)$ es la esperanza del retorno de mercado.

Para conseguir los datos, en primer lugar, se obtuvo la tasa de interés libre de riesgo. Esta se calculó de las tasas como el promedio de la tasa de interés de los bonos del Banco Central (2024), de lo que se obtuvo una tasa libre de riesgo (R_f) de un 4,47%.

En segundo lugar, se obtuvo la sensibilidad del mercado de Energía Verde y Renovable (Damodaran, 2024). Esta sensibilidad β_i es de un 3,46.

En tercer y último lugar, se obtuvo la esperanza de retorno del mercado ($E(R_m)$), Según Imarc (s.f) es de un 4,54%.

Con estos datos, se pudo obtener la tasa de descuento del mercado, que es igual a:

$$E(R_i) = 4,47\% + 3,46 * (4,54\% - 4,47\%) = 4,58\%. \quad (23)$$

Ecuación 23: Tasa de descuento del mercado de energías verdes y renovables

Resultados Flujo de Caja

Como se puede observar en la ecuación 19, los ingresos operacionales son considerablemente menores que los costos operacionales y al mantenerse estos constantes durante el tiempo, resultan en un flujo de caja siempre negativo. Para abordar esta situación, se propone agregar un subsidio mensual que reduzca los costos operacionales.

El propósito de este flujo de caja es obtener la variable de costo para el amoniac, con el objetivo de que el VAN sea 0, y el costo sea mayor a 0. Se harán cambios en el subsidio mensual, ya que es el único valor que irá variando en el tiempo. Se propondrá en primer lugar un subsidio del 50% de los costos, y se irá aumentando en 5% hasta que el costo sea positivo. Este resultado se mostrará en Anexos 2.

Con respecto al financiamiento del proyecto, se financiará con un 50% del subsidio, y otro 50% de patrimonio de los inversionistas.

Subsidio a la Inversión.

Inicialmente, se considerará un subsidio que cubra el 50% de las inversiones iniciales, es decir, del capital de trabajo y la inversión en activos. De esta forma, se obtiene un subsidio inicial de:

$$(66.171.300.000 + 8.084.199.183) \text{ USD} * 0,5 = 37.127.749.591 \quad (24)$$

Ecuación 24: Subsidio a la inversión inicial del proyecto

Subsidio Mensual.

Se considerará un subsidio mensual que cubra el 50% de los costos operacionales, esto es:

$$\begin{aligned} & (32.645.224.965 + 2.913.600 + 8700 + 34.042.300) \text{ USD} * 0,5 \\ & = 16.341.094.782 \text{ USD} \quad (25) \end{aligned}$$

Ecuación 25: Subsidio de 50% total mensual

Con este subsidio mensual, el VAN igual a cero se consigue con un costo de -44,92, lo que es imposible.

Se repitió este proceso, aumentando el subsidio en 5%, hasta que el costo sea negativo.

Este proceso iterativo conlleva a que los costos deben ser cubiertos 100% por algún subsidio mensual, y el costo al que se producirá el amoníaco con este subsidio será de un \$0,77 USD. Este flujo de caja se mostrará en Anexos 3.

De la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde de Chile (2020), Chile en 2030 pretende producir Hidrógeno Verde a un costo de \$1,5 $\frac{\text{USD}}{\text{kgH}_2}$. Este último se pasará a $\frac{\text{USD}}{\text{kgNH}_3}$ multiplicando por la cantidad de hidrógeno necesaria para formar una tonelada de amoníaco. De esta forma, si se realiza la siguiente ecuación:

$$\frac{\$1,5\text{USD}}{\text{kgH}_2} * \frac{177 \text{ kgH}_2}{1000 \text{ kgNH}_3} = 0,27 \frac{\text{USD}}{\text{kgNH}_3}$$

Según Armijo y Philibert (2020, p.1553) el valor promedio de convertir hidrógeno a amoníaco es de $\$0,484 \frac{USD}{kgNH_3}$, por lo que el costo total de producir amoníaco verde es de $\$0,75 \frac{USD}{kgNH_3}$, es decir, un poco más bajo que el costo con un subsidio mensual de 100% .

Sin embargo, aun cuando el proyecto funcione con un subsidio mensual de un 100%, si este subsidio no se entrega, el proyecto no es rentable.

A simple vista existen tres maneras de que este proyecto funcione. La primera es que la tecnología necesaria para exportar mediante barcos baje sus costos, tales como los tanques, el barco, las mantenciones de este, etcétera. La segunda es que el mismo amoníaco que se quiere exportar se utilice como combustible, de esta forma se necesitaría menos diésel, y, por lo tanto, se reduciría un gran costo. La tercera y última, es que el Gobierno se encargue del proyecto, y que se realice con su financiamiento, sin embargo, el proyecto no será rentable a largo plazo.

Otra opción para que el proyecto sea viable es la implementación de regulaciones y políticas que obliguen a las empresas a dejar de utilizar combustibles fósiles en sus procesos, lo que las impulsaría a buscar alternativas más sostenibles. Una de estas alternativas podría ser la compra de amoníaco verde. Como resultado, la demanda de amoníaco verde aumentaría, elevando también su precio. Con un costo de $\$0,75 \frac{USD}{kg}$, y un subsidio mensual de 0% al 2030, por ejemplo, el precio debería subir a $\$94,3 \frac{USD}{kg}$ para que el proyecto sea rentable, lo cual es improbable.

Conclusiones y Recomendaciones

El presente informe tuvo como objetivo analizar las mejores opciones para transportar hidrógeno verde en Chile, mediante un análisis estratégico con Australia, país similar a Chile, uno técnico de las alternativas posibles y un análisis económico de la opción seleccionada como óptima. Para ello, se realizó un análisis comparativo con Australia, evaluando la posición de Chile en la industria del hidrógeno e identificando las mejores prácticas de Australia en cuanto a almacenamiento y distribución.

El análisis reveló que Australia posee ventajas que Chile aún no ha desarrollado, como asociaciones dedicadas a la investigación y desarrollo, con un fuerte enfoque en la industria del hidrógeno verde. Además, Australia produce hidrógeno limpio mediante la captura y almacenamiento de combustibles fósiles, y lo exporta en estado líquido a otros países utilizando un barco especializado llamado "The Suiso Frontier". Este país se ha convertido en un referente en la industria, lo que plantea la pregunta: ¿qué método de almacenamiento y distribución sería óptimo para que Chile pueda avanzar rápidamente en esta industria?

Tras un análisis cualitativo de las características técnicas de los métodos de almacenamiento y transporte, se concluyó que el mejor método de almacenamiento es el amoníaco verde, seleccionado por su madurez tecnológica, la energía necesaria para la conversión y reconversión, y los costos de transporte por kilómetro. El transporte marítimo fue identificado como el mejor método debido a la distancia de Chile respecto a los países más desarrollados y a la capacidad de estos.

De este análisis surge la siguiente pregunta: ¿Es esta opción económicamente viable para una empresa? Los resultados de este análisis se extrapolarán a nivel nacional.

Previo a realizar el análisis económico, es esencial entender el mercado global de la industria: la demanda internacional, los precios a los que se transará el hidrógeno, los principales países demandantes y las tecnologías de almacenamiento del amoníaco. Todo esto se realiza con el propósito de tomar decisiones informadas sobre la estrategia de distribución del amoníaco a nivel internacional.

Finalmente, se elaboró un flujo de caja considerando la producción de una empresa chilena, junto con todos los costos operacionales e inversiones necesarios para que esta sea viable. Además, se contemplaron subsidios para financiar parte del proyecto. El análisis del flujo de caja indica que se requiere un costo de $\$0,77 \frac{USD}{kg}$ para que la venta y distribución del amoníaco sea rentable. Según la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde de Chile, esto será viable en el 2030, sin embargo, con un subsidio mensual de 100%, lo que es improbable. Por otro lado, se pudo ver que uno de los costos que más impactan en el resultado del flujo de caja es el combustible, por lo que si este precio baja, y se implementan regulaciones que tengan como consecuencia que la demanda aumente, también aumentará el precio del amoníaco, y de esta forma, venderlo será rentable.

En conclusión, los resultados permiten establecer tres puntos clave. Primero, Australia es un referente en almacenamiento y distribución de hidrógeno verde, con tecnologías e investigaciones avanzadas que la posicionan como uno de los principales competidores en la industria, a pesar de los desafíos. Segundo, el estudio reveló que la combinación más adecuada para Chile es el transporte marítimo utilizando amoníaco verde como portador, aunque esta opción, si bien es técnicamente óptima, enfrenta serios desafíos económicos. Tercero, aunque la demanda global puede ser volátil, las proyecciones actuales sugieren un aumento significativo a largo plazo, con precios a la baja y una mayor demanda de países en Asia y Estados Unidos.

Los hallazgos de este estudio tienen implicaciones significativas para el país. Elegir un método inadecuado de almacenamiento y distribución podría resultar en grandes pérdidas económicas, además de retrasar el desarrollo de la industria del hidrógeno verde en Chile. Esto además de afectar la competitividad internacional del país en este sector emergente, también comprometería su capacidad para cumplir con los objetivos de sostenibilidad y descarbonización.

Por otro lado, una decisión informada y estratégica podría posicionar a Chile como un líder en la exportación de hidrógeno verde, aprovechando su abundancia de recursos renovables. Implementar las mejores prácticas identificadas, como el uso del amoníaco verde y el transporte marítimo, permitiría minimizar los costos operacionales y maximizar la eficiencia y sostenibilidad del proceso de distribución.

No obstante, es crucial tener en cuenta los desafíos económicos que estas tecnologías enfrentan en la actualidad. La dependencia de elevados subsidios para lograr la rentabilidad sugiere que la solución técnicamente óptima no siempre es la más viable desde una perspectiva económica.

A pesar de los hallazgos obtenidos, este estudio presenta ciertas limitaciones que podrían haber afectado los resultados. Una de las principales limitaciones es la falta de información detallada sobre los precios de los tanques, así como sobre su utilización y manejo. Además, la incertidumbre en torno al consumo interno de amoníaco por parte del proyecto "HyEx" dificulta la estimación precisa de las cantidades que se venderán y exportarán, por lo que se consideró una cantidad fija a través de los años. Finalmente, no se consideró la variación de los costos a lo largo del tiempo debido a la falta de información disponible.

En vista de las limitaciones identificadas, se sugiere que futuras investigaciones se enfoquen en obtener datos más precisos sobre la variación en la oferta del proyecto "HyEx" a lo largo del

tiempo, así como en el análisis de los costos de las tecnologías de distribución empleadas. Además, se debe investigar más a fondo la variabilidad en los precios de los tanques, considerando que estos pueden fluctuar según el proveedor, y explorar con mayor detalle su manejo y utilización.

Una de las preguntas que surgen para futuras investigaciones es si, con el aumento en la madurez de las tecnologías y las regulaciones que implementen los países en línea con el Acuerdo de París, la distribución de amoníaco será viable. Con el avance tecnológico, se espera que los costos de los equipos disminuyan. Al mismo tiempo, las posibles regulaciones podrían incrementar la demanda de amoníaco e hidrógeno verde, elevando su precio de venta y, en consecuencia, haciendo más rentable su comercialización.

La relevancia de este estudio radica en el potencial para fortalecer la posición de Chile en el mercado global, ya que Chile busca consolidarse actualmente como un competidor destacado en la industria, es importante abordar las áreas de mejora ya mencionadas. Además, implementar estas estrategias puede contribuir a aumentar la competitividad al país, siendo un país más relevante en la industria en el ámbito internacional.

Finalmente, es importante destacar que este estudio proporciona soluciones tanto técnicas como financieras para abordar el desafío de la distribución de hidrógeno verde, las cuales pueden ser consideradas en futuras evaluaciones del transporte de este recurso.

Anexos

1. Ecuación de la estimación de la demanda global de hidrógeno verde en Mton por año

$$\text{Demanda} = 0,11 * (\text{año})^3 - 1,4 * (\text{año})^2 + 12,25 * (\text{año}) + 20$$

2. Flujo de caja con subsidio mensual de 50% de los costos operacionales

2036	2037	2038	2039	2040
\$ 16.686.487.616	\$ 16.686.487.616	\$ 16.686.487.616	\$ 16.686.487.616	\$ 16.686.487.616
\$ 345.392.833	\$ 345.392.833	\$ 345.392.833	\$ 345.392.833	\$ 345.392.833
\$ 16.341.094.782	\$ 16.341.094.782	\$ 16.341.094.782	\$ 16.341.094.782	\$ 16.341.094.782
-\$ 16.611.435.716	-\$ 16.611.435.716	-\$ 16.611.435.716	-\$ 16.611.435.716	-\$ 16.611.435.716
-\$ 16.574.471.116	-\$ 16.574.471.116	-\$ 16.574.471.116	-\$ 16.574.471.116	-\$ 16.574.471.116
\$ 16.070.753.849	\$ 16.070.753.849	\$ 16.070.753.849	\$ 16.070.753.849	\$ 16.070.753.849
-\$ 32.645.224.965	-\$ 32.645.224.965	-\$ 32.645.224.965	-\$ 32.645.224.965	-\$ 32.645.224.965
-\$ 36.964.600	-\$ 36.964.600	-\$ 36.964.600	-\$ 36.964.600	-\$ 36.964.600
-\$ 2.913.600	-\$ 2.913.600	-\$ 2.913.600	-\$ 2.913.600	-\$ 2.913.600
-\$ 34.042.300	-\$ 34.042.300	-\$ 34.042.300	-\$ 34.042.300	-\$ 34.042.300
-\$ 8.700	-\$ 8.700	-\$ 8.700	-\$ 8.700	-\$ 8.700
\$ 75.051.900	\$ 75.051.900	\$ 75.051.900	\$ 75.051.900	\$ 75.051.900
-\$ 4.030.565.000	-\$ 4.030.565.000	-\$ 4.030.565.000	-\$ 4.030.565.000	-\$ 4.030.565.000
-\$ 23.733.078.600	-\$ 27.688.591.700	-\$ 31.644.104.800	-\$ 35.599.617.900	-\$ 39.555.131.000
-\$ 27.688.591.700	-\$ 31.644.104.800	-\$ 35.599.617.900	-\$ 39.555.131.000	-\$ 43.510.644.100
-\$ 75.051.900	-\$ 75.051.900	-\$ 75.051.900	-\$ 75.051.900	-\$ 75.051.900
-\$ 27.763.643.600	-\$ 31.719.156.700	-\$ 35.674.669.800	-\$ 39.630.182.900	-\$ 43.585.696.000
\$ 4.030.565.000	\$ 4.030.565.000	\$ 4.030.565.000	\$ 4.030.565.000	\$ 4.030.565.000
\$ 23.733.078.600	\$ 27.688.591.700	\$ 31.644.104.800	\$ 35.599.617.900	\$ 39.555.131.000
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
-\$ 0	-\$ 0	-\$ 0	-\$ 0	-\$ 0

2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
	\$ 16,686,487.616	\$ 16,686,487.616	\$ 16,686,487.616	\$ 16,686,487.616	\$ 16,686,487.616	\$ 16,686,487.616
	\$ 345,392.833	\$ 345,392.833	\$ 345,392.833	\$ 345,392.833	\$ 345,392.833	\$ 345,392.833
	\$ 16,341,094.782	\$ 16,341,094.782	\$ 16,341,094.782	\$ 16,341,094.782	\$ 16,341,094.782	\$ 16,341,094.782
	-\$ 16,611,435.716	-\$ 16,611,435.716	-\$ 16,611,435.716	-\$ 16,611,435.716	-\$ 16,611,435.716	-\$ 16,611,435.716
	-\$ 16,574,471.116	-\$ 16,574,471.116	-\$ 16,574,471.116	-\$ 16,574,471.116	-\$ 16,574,471.116	-\$ 16,574,471.116
	\$ 16,070,753.849	\$ 16,070,753.849	\$ 16,070,753.849	\$ 16,070,753.849	\$ 16,070,753.849	\$ 16,070,753.849
	-\$ 32,645,224.965	-\$ 32,645,224.965	-\$ 32,645,224.965	-\$ 32,645,224.965	-\$ 32,645,224.965	-\$ 32,645,224.965
	-\$ 36,964.600	-\$ 36,964.600	-\$ 36,964.600	-\$ 36,964.600	-\$ 36,964.600	-\$ 36,964.600
	-\$ 2,913.600	-\$ 2,913.600	-\$ 2,913.600	-\$ 2,913.600	-\$ 2,913.600	-\$ 2,913.600
	-\$ 34,042.300	-\$ 34,042.300	-\$ 34,042.300	-\$ 34,042.300	-\$ 34,042.300	-\$ 34,042.300
	-\$ 8,700	-\$ 8,700	-\$ 8,700	-\$ 8,700	-\$ 8,700	-\$ 8,700
	\$ 75,051.900	\$ 75,051.900	\$ 75,051.900	\$ 75,051.900	\$ 75,051.900	\$ 75,051.900
	-\$ 4,030,565.000	-\$ 4,030,565.000	-\$ 4,030,565.000	-\$ 4,030,565.000	-\$ 4,030,565.000	-\$ 4,030,565.000
	\$ -	-\$ 3,955,513.100	-\$ 7,911,026.200	-\$ 11,866,539.300	-\$ 15,822,052.400	-\$ 19,777,565.500
	-\$ 3,955,513.100	-\$ 7,911,026.200	-\$ 11,866,539.300	-\$ 15,822,052.400	-\$ 19,777,565.500	-\$ 23,733,078.600
	-\$ 75,051.900	-\$ 75,051.900	-\$ 75,051.900	-\$ 75,051.900	-\$ 75,051.900	-\$ 75,051.900
	-\$ 4,030,565.000	-\$ 7,986,078.100	-\$ 11,941,591.200	-\$ 15,897,104.300	-\$ 19,852,617.400	-\$ 23,808,130.500
	\$ 4,030,565.000	\$ 4,030,565.000	\$ 4,030,565.000	\$ 4,030,565.000	\$ 4,030,565.000	\$ 4,030,565.000
	\$ -	\$ 3,955,513.100	\$ 7,911,026.200	\$ 11,866,539.300	\$ 15,822,052.400	\$ 19,777,565.500
-\$ 8,084,199.183	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
-\$ 66,171,300.000	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 37,127,749.591	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 37,127,749.591	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 0 -	-\$ 0	-\$ 0	-\$ 0	-\$ 0	-\$ 0	-\$ 0

Periodo
Ingresos operacionales
Amoniaco
Subsidio mensual
Costos
Operacionales
Costos
Amoniaco
Combustible
Costos Fijos
Personal
Mantencción
Seguridad
EBITDA
Depreciación
Pérdida del
EBT
Impuestos
UNDI
Depreciación
Pérdida del ejercicio
Capital de trabajo
Inversión
Subsidio
Patrimonio
FC

3. Flujo de caja con subsidio mensual de 100% de los costos operacionales

2035	2036	2037	2038	2039	2040
\$33.027.582.398	\$33.027.582.398	\$33.027.582.398	\$33.027.582.398	\$33.027.582.398	\$33.027.582.398
\$345.392.833	\$345.392.833	\$345.392.833	\$345.392.833	\$345.392.833	\$345.392.833
\$32.682.189.565	\$32.682.189.565	\$32.682.189.565	\$32.682.189.565	\$32.682.189.565	\$32.682.189.565
-\$32.952.530.498	-\$32.952.530.498	-\$32.952.530.498	-\$32.952.530.498	-\$32.952.530.498	-\$32.952.530.498
-\$32.915.565.898	-\$32.915.565.898	-\$32.915.565.898	-\$32.915.565.898	-\$32.915.565.898	-\$32.915.565.898
-\$270.340.933	-\$270.340.933	-\$270.340.933	-\$270.340.933	-\$270.340.933	-\$270.340.933
-\$32.645.224.965	-\$32.645.224.965	-\$32.645.224.965	-\$32.645.224.965	-\$32.645.224.965	-\$32.645.224.965
-\$36.964.600	-\$36.964.600	-\$36.964.600	-\$36.964.600	-\$36.964.600	-\$36.964.600
-\$2.913.600	-\$2.913.600	-\$2.913.600	-\$2.913.600	-\$2.913.600	-\$2.913.600
-\$34.042.300	-\$34.042.300	-\$34.042.300	-\$34.042.300	-\$34.042.300	-\$34.042.300
-\$8.700	-\$8.700	-\$8.700	-\$8.700	-\$8.700	-\$8.700
\$75.051.900	\$75.051.900	\$75.051.900	\$75.051.900	\$75.051.900	\$75.051.900
-\$4.030.565.000	-\$4.030.565.000	-\$4.030.565.000	-\$4.030.565.000	-\$4.030.565.000	-\$4.030.565.000
-\$19.777.565.500	-\$23.733.078.600	-\$27.688.591.700	-\$31.644.104.800	-\$35.599.617.900	-\$39.555.131.000
-\$23.733.078.600	-\$27.688.591.700	-\$31.644.104.800	-\$35.599.617.900	-\$39.555.131.000	-\$43.510.644.100
-\$75.051.900	-\$75.051.900	-\$75.051.900	-\$75.051.900	-\$75.051.900	-\$75.051.900
-\$23.808.130.500	-\$27.763.643.600	-\$31.719.156.700	-\$35.674.669.800	-\$39.630.182.900	-\$43.585.696.000
\$4.030.565.000	\$4.030.565.000	\$4.030.565.000	\$4.030.565.000	\$4.030.565.000	\$4.030.565.000
\$19.777.565.500	\$23.733.078.600	\$27.688.591.700	\$31.644.104.800	\$35.599.617.900	\$39.555.131.000
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0

Periodos	2029	2030	2031	2032	2033	2034
Ingresos operacionales		\$33.027.582.398	\$33.027.582.398	\$33.027.582.398	\$33.027.582.398	\$33.027.582.398
Amoniacio		\$345.392.833	\$345.392.833	\$345.392.833	\$345.392.833	\$345.392.833
Subsidio mensual		\$32.682.189.565	\$32.682.189.565	\$32.682.189.565	\$32.682.189.565	\$32.682.189.565
Costos Operacionales		-\$32.952.530.498	-\$32.952.530.498	-\$32.952.530.498	-\$32.952.530.498	-\$32.952.530.498
Costos variables		-\$32.915.565.898	-\$32.915.565.898	-\$32.915.565.898	-\$32.915.565.898	-\$32.915.565.898
Amoniacio		-\$270.340.933	-\$270.340.933	-\$270.340.933	-\$270.340.933	-\$270.340.933
Combustible		-\$32.645.224.965	-\$32.645.224.965	-\$32.645.224.965	-\$32.645.224.965	-\$32.645.224.965
Costos Fijos		-\$36.964.600	-\$36.964.600	-\$36.964.600	-\$36.964.600	-\$36.964.600
Personal		-\$2.913.600	-\$2.913.600	-\$2.913.600	-\$2.913.600	-\$2.913.600
Mantenimiento barco		-\$34.042.300	-\$34.042.300	-\$34.042.300	-\$34.042.300	-\$34.042.300
Seguridad		-\$8.700	-\$8.700	-\$8.700	-\$8.700	-\$8.700
EBITDA		\$75.051.900	\$75.051.900	\$75.051.900	\$75.051.900	\$75.051.900
Depreciación		-\$4.030.565.000	-\$4.030.565.000	-\$4.030.565.000	-\$4.030.565.000	-\$4.030.565.000
Pérdida del ejercicio		0	-\$3.955.513.100	-\$7.911.026.200	-\$11.866.539.300	-\$15.822.052.400
EBT		-\$3.955.513.100	-\$7.911.026.200	-\$11.866.539.300	-\$15.822.052.400	-\$19.777.565.500
Impuestos		-\$75.051.900	-\$75.051.900	-\$75.051.900	-\$75.051.900	-\$75.051.900
UNDI		-\$4.030.565.000	-\$7.986.078.100	-\$11.941.591.200	-\$15.897.104.300	-\$19.852.617.400
Depreciación		\$4.030.565.000	\$4.030.565.000	\$4.030.565.000	\$4.030.565.000	\$4.030.565.000
Pérdida del ejercicio		0	\$3.955.513.100	\$7.911.026.200	\$11.866.539.300	\$15.822.052.400
Capital de trabajo	-\$8.084.199.183	0	0	0	0	0
Inversión	-\$66.171.300.000	0	0	0	0	0
Subsidio	\$37.127.749.591	0	0	0	0	0
Patrimonio	\$37.127.749.591	0	0	0	0	0
FC	0	0	0	0	0	0

Referencias

- Alcalde, S. (3 de enero de 2023). Ventajas e inconvenientes del hidrógeno como combustible alternativo. *National geographic*.
https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/ventajas-e-inconvenientes-hidrogeno-como-combustible-alternativo_14897
- Álvarez, M. (17 de diciembre de 2021). *Hidrógeno como alternativa sustentable a los combustibles fósiles*. Santo Tomás en Línea.
- ANZ. (s. f.). *THE ANZ HYDROGEN HANDBOOK VOL II: AUSTRALIA AND HYDROGEN*. 4. Recuperado 10 de septiembre de 2024, de <https://www.anz.com/content/dam/anzcom/pdf/institutional/reports/australia-and-hydrogen.pdf>
- Armijo, J., & Philibert, C. (2020). Flexible production of green hydrogen and ammonia from variable solar and wind energy: Case study of Chile and Argentina. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(3), 1541-1558. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.028>
- Asociación Chilena del Hidrógeno. (s.f). Cadena de Valor Almacenamiento. Recuperado 17 de noviembre de 2023, de <https://h2chile.cl/cadena-valor-almacenamiento/>
- Banco Central. (2024). *Base de Datos Estadísticos (BDE)*. Bcentral.cl.
https://si3.bcentral.cl/Siete/ES/Siete/Cuadro/CAP_TASA_INTERES/MN_TASA_INTERES_09/TMS_15/T311?cbFechaInicio=2016&cbFechaTermino=2024&cbFrecuencia=ANNUAL&cbCalculo=NONE&cbFechaBase=

Barlett, J. (Diciembre de 2022). *Chile apuesta al hidrógeno verde*. Imf.org.

<https://www.imf.org/es/Publications/fandd/issues/2022/12/country-case-chile-bet-on-green-hydrogen->

Bartlett#:~:text=Una%20estrategia%20nacional%20ambiciosa%20de,principales%20del%20mundo%20para%202040

Battery Depot. (22 de febrero de 2023). *¿Cuánto cuesta mantener un barco?* Battery Depot.

<https://batterydepot.com.mx/blog/cuanto-cuesta-mantener-un-barco/>

Bertram, R. (9 de enero de 2024). *Challenges to Chile becoming a green hydrogen superpower*.

Energytransition.org. <https://energytransition.org/2024/01/challenges-to-chile-becoming-a-green-hydrogen-superpower/>

Bialystocki, N., & Konovessis, D. (2015). *On the estimation of ship's fuel consumption and speed curve: A statistical approach*. 163.

https://www.researchgate.net/figure/Preliminary-fuel-consumption-and-speed-curve_fig3_299576545

Bitran, E., & Agosin, M. (Julio 2022). *Mirada FEN*.

<https://mirada.fen.uchile.cl/articulo/ver/desafios-y-oportunidades-de-la-estrategia-nacional-de-hidrogeno-verde>

BNamericas. (Octubre de 2022). *Hidrógeno verde: así avanza América Latina y los líderes en proyectos*.

<https://www.bnamericas.com/es/reportajes/hidrogeno-verde-asi-avanza-america-latina-y-los-lideres-en-proyectos>

Bruce S, Temminghoff M, Hayward J, Schmidt E, Munnings C, Palfreyman D y Hartley P. (2018).

National Hydrogen Roadmap. *CSIRO, Australia*.

CAMPORT. (14 de junio de 2023). *Análisis: Indicador de Desempeño Logístico “LPI” 2023*.

Camport. <https://www.camport.cl/indicador-de-desempeno-logistico-lpi-2023/>

CELO. (s. f.). *Fragilización por hidrógeno*. CELO Industrial Fasteners. Recuperado 10 de

septiembre de 2024, de <https://www.celofasteners.com/es/content/241-fragilizacion-por-hidrogeno>

Centramar. (s. f.). *¿Qué tipo de combustible utilizan los barcos?* Centramar.es. Recuperado 11

de septiembre de 2024, de <https://www.centramar.es/combustible-barcos/>

CEPAL. (2022). *Ley Marco de Cambio Climático (Ley No. 21.455)*. Cepal.org.

<https://observatoriop10.cepal.org/es/instrumento/ley-marco-cambio-climatico-ley-no-21455>

Chang, A. (1 de agosto de 2022). *Australia green hydrogen: Production costs to drop 37% by*

2030. Infolink-group.com. <https://www.infolink-group.com/energy-article/green-hydrogen-costs-in-australia-to-reduce-37-by-2030>

CORFO. (2024a). *Centro Tecnológico para la Innovación en Hidrógeno Verde en Magallanes*.

Corfo.cl. <https://www.corfo.cl/sites/cpp/convocatorias/ccfc-innovacion-hidrogeno-verde-magallanes>

CORFO. (2023). *CORFO - Corporación de Fomento de la Producción*. CORFO.

https://www.corfo.cl/sites/cpp/sala_de_prensa/nacional/23_11_2023_curso_hidrogeno_verde_;jsessionid=JX0g3v3-

CORFO. (2024b). *FABRICACIÓN Y/O ENSAMBLAJE DE ELECTROLIZADORES Y SUS COMPONENTES EN CHILE*. Corfo.cl.

<https://www.corfo.cl/sites/cpp/convocatorias/fabricacion-ensamble-de-electrolizadores-y-sus-componentes-chile>

Crowcon. (22 de enero de 2021). *Los peligros del hidrógeno*.

<https://www.crowcon.com/es/blog/the-dangers-of-hydrogen/>

CSIRO. (2023). *CSIRO launches \$10m project to build Australia's first movable hydrogen generator*. <https://www.csiro.au/en/news/All/News/2023/May/CSIRO-launches-10m-project-to-build-Australias-first-movable-hydrogen-generator>

Data Club Chile. (22 de diciembre de 2021). *Quiénes somos*. Data Cube Chile -; Data Cube Chile. <https://datacubechile.cl/quienes-somos/>

DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS, EXTENSIÓN Y PUBLICACIONES. (22 de mayo de 2017). *Impacto Ambiental de Desalinización de Agua de Mar*. Bcn.cl.

<https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/24441/2/Impacto%20Ambiental%20de%20Desalinizaci%C3%B3n%20de%20Agua%20de%20Mar.pdf>

Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water. (2023). *Australia's National Hydrogen Strategy*. Gov.au. <https://www.dcceew.gov.au/energy/publications/australias-national-hydrogen->

strategy#:~:text=Australia's%20National%20Hydrogen%20Strategy%20sets,explores%20Australia's%20clean%20hydrogen%20potential

Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water. (2024a). *Environment Protection Australia*. Gov.au. <https://www.dcceew.gov.au/environment/epbc/epbc-act-reform/environment-protection-australia>

Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water. (2024b). *Hydrogen Headstart program*. Gov.au. <https://www.dcceew.gov.au/energy/hydrogen/hydrogen-headstart-program>

Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water. (s. f.-a). *Net Zero*. Gov.au. Recuperado 10 de septiembre de 2024, de <https://www.dcceew.gov.au/climate-change/emissions-reduction/net-zero#:~:text=The%20Net%20Zero%20Plan%20will,our%20international%20and%20domestic%20commitments.>

Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water. (s. f.-b). *Renewables*. Gov.au. Recuperado 10 de septiembre de 2024, de <https://www.energy.gov.au/energy-data/australian-energy-statistics/renewables>

Edwardes-Evans, H., Perez, M., & Burgess, J. (14 de agosto de 2024). *Interactive: Platts Ammonia price chart*. S&P Global Commodity Insights. <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/energy-transition/051023-interactive-ammonia-price-chart-natural-gas-feedstock-europe-usgc-black-sea>

El Mostrador. (19 de diciembre de 2022). Chile concreta exportación de energía renovable a Argentina mediante línea de transmisión ubicada entre Antofagasta y Salta. *El Mostrador*. <https://www.elmostrador.cl/mercados/2022/12/19/chile-concreta-exportacion-de-energia-renovable-a-argentina-mediante-linea-de-transmision-ubicada-entre-antofagasta-y-salta/>

Enaex. (s. f.). *HyEx*. Enaex Chile. Recuperado 10 de septiembre de 2024, de <https://www.enaex.com/cl/es/hyex/>

Exportaciones Chile. (2023). *Chile - Exportaciones de Mercancías*. Datosmacro.com. <https://datosmacro.expansion.com/comercio/exportaciones/chile>

Generadoras. (s. f.). *Gobierno anuncia fondo de US\$ 1.000 millones para impulsar hidrógeno verde en el país*. Generadoras de Chile. Recuperado 10 de septiembre de 2024, de <https://generadoras.cl/prensa/gobierno-anuncia-fondo-de-usdollar-1000-millones-para-impulsar-hidrogeno-verde-en-el-pais>

Giménez, J. (2019). La hora del hidrógeno verde. *Gas renovable*. 24-34.

Gobierno de Chile. (s. f.-a). *Gobierno presenta la Estrategia Nacional para que Chile sea líder mundial en hidrógeno verde*. gob.cl. Recuperado 10 de septiembre de 2024, de <https://www.gob.cl/noticias/gobierno-presenta-la-estrategia-nacional-para-que-chile-sea-lider-mundial-en-hidrogeno-verde/>

Gobierno de Chile. (s. f.-b). *Preguntas Frecuentes*. Planhidrogenoverde.cl. Recuperado 10 de septiembre de 2024, de <https://www.planhidrogenoverde.cl/preguntas-frecuentes/>

Gulli, C., Heid, B., Noffsinger, J., Waardenburg, M., & Wilthaner, M. (10 de enero de 2024). *Global energy perspective 2023: Hydrogen outlook*. Mckinsey.com; McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2023-hydrogen-outlook>

Heggie, J. (s. f.). Making Every Drop Count: How Australia is Securing its Water Future. *National Geographic*. Recuperado 10 de septiembre de 2024, de <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/partner-content-how-australia-is-securing-its-water-future>

HESC. (s. f.). *The suiso frontier*. HESC; Hydrogen Energy Supply Chain (HESC) Project. Recuperado 10 de septiembre de 2024, de <https://www.hydrogenenergysupplychain.com/about-the-pilot/supply-chain/the-suiso-frontier/>

Hidrógeno Verde. (s. f.). *Precio del Hidrógeno*. Hidrogeno verde. Recuperado 10 de septiembre de 2024, de <https://hidrogeno-verde.es/precio-del-hidrogeno/>

Hine, L., Ang, I., & Collins, L. (30 de mayo de 2024). *Fortescue seeks to order five Very Large Ammonia Carrier vessels valued at more than \$120m each: report*. Hydrogeninsight.com. <https://www.hydrogeninsight.com/transport/fortescue-seeks-to-order-five-very-large-ammonia-carrier-vessels-valued-at-more-than-120m-each-report/2-1-1652591>

Hurwitz, Z., Bujak, N., Tapia, M., Daza, E., & Gischler, C. (6 de junio de 2023). *Aspectos clave para gestionar los riesgos ambientales y sociales del hidrógeno verde*. Sostenibilidad.

<https://blogs.iadb.org/sostenibilidad/es/aspectos-clave-para-gestionar-los-riesgos-ambientales-y-sociales-del-hidrogeno-verde/>

Iberdrola. (s.f). El hidrógeno verde: una alternativa para reducir las emisiones y cuidar nuestro planeta. <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/hidrogeno-verde>

IEA. (2023a). *Global Hydrogen Review 2023*. <https://www.iea.org>

IEA. (Agosto de 2021). Hidrógeno en América Latina: De las oportunidades a corto plazo al despliegue a gran escala. <https://www.iea.org>

IEA. (2023b, abril 25). *Net zero 2050 - Australia's long-term emissions reduction plan*. IEA. <https://www.iea.org>

IEA. (2019). *The Future of Hydrogen*. <https://www.iea.org>

IMARC. (s. f.). En *Tamaño, Participación, Crecimiento e Informe de la Industria del Mercado de Amoníaco*. Recuperado 11 de septiembre de 2024, de <https://www.imarcgroup.com/report/es/ammonia-market>

Ini, L. (2023, septiembre 5). *La planta chilena de hidrógeno Haru Oni tendrá una nueva unidad de captura directa de aire*. pv magazine Latin America. <https://www.pv-magazine-latam.com/2023/09/05/la-planta-chilena-de-hidrogeno-haru-oni-tendra-una-nueva-unidad-de-captura-directa-de-aire/>

IRENA (2022), *Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor*, International Renewable Energy Agency.

IRENA (2022), *Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: Part I – Trade outlook for 2050 and way forward*, International Renewable Energy Agency.

Jordan-Peters, C. (2023). New hydrogen electrolyser tech can help to decarbonise industry. *CSIRO* . <https://www.csiro.au/en/news/all/articles/2023/august/green-hydrogen-technology>

Kaempf, J. (12 de mayo de 2024). More desalination is coming to Australia's driest states – but super-salty outflows could trash ecosystems and fisheries. *The Conversation*.
<http://theconversation.com/more-desalination-is-coming-to-australias-driest-states-but-super-salty-outflows-could-trash-ecosystems-and-fisheries-229629>

Karunakaran, R. (2017). *How much does a captain of an LNG tanker ship make per year?* Quora. <https://www.quora.com/How-much-does-a-captain-of-an-LNG-tanker-ship-make-per-year>

Lauerer, M. (17 de marzo de 2023). *Combustible sintético para Alemania producido en Chile*. Deutsche Welle. <https://www.dw.com/es/la-planta-en-chile-que-produce-combustible-sint%C3%A9tico-para-alemania/a-65030622>

Ma, N., Zhao, W., Wang, W., Li, X., & Zhou, H. (2023). *Large scale of green hydrogen storage: Opportunities and challenges*. International Journal of Hydrogen Energy. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.021>

Martínez, M. (21 de diciembre de 2023). *qué es la densidad energética de una batería y cómo ha evolucionado en los últimos años*. Renault.es.
<https://www.renault.es/blog/actualidad/densidad-energetica-bateria.html>

Minería Chilena. (3 de febrero de 2023). *Proyecto HyEx para producción de amoníaco verde recibe aporte financiero de japonesa NEDO*. Mch. <https://www.mch.cl/negocios-industria/proyecto-hyex-para-produccion-de-amoniaco-verde-recibe-aporte-financiero-de-japonesa-nedo/>

Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación. (s. f.). *Artículo: Inversión Total De Investigación Y Desarrollo En Chile Se Mantiene En Un 0,34% Del Pib Y Completa Diez Años Sin Mayores Variaciones*. MinCiencia. Recuperado 10 de septiembre de 2024, de <https://www.minciencia.gob.cl/noticias/inversion-total-de-investigacion-y-desarrollo-en-chile-se-mantiene-en-un-034-del-pib-y-completa-diez-anos-sin-mayores-variaciones/>

Ministerio de Economía, Fomento y Turismo. (s. f.). *Gobierno presenta Fondo por US\$ 1.000 millones para el desarrollo del Hidrógeno Verde en Chile*. Hacienda.cl. Recuperado 10 de septiembre de 2024, de <https://www.hacienda.cl/noticias-y-eventos/noticias/gobierno-presenta-fondo-por-us-1-000-millones-para-el-desarrollo-del-hidrogeno>

Ministerio de Energía. (3 de abril de 2023). *ERNC y otro récord: generación eléctrica en base a este tipo de energía llegó al 41% en lo que va de 2024*. Gob.Cl. <https://energia.gob.cl/noticias/nacional/ernc-y-otro-record-generacion-electrica-en-base-este-tipo-de-energia-llego-al-41-en-lo-que-va-de-2024>

Ministerio de Energía. (Noviembre de 2020). Estrategia Nacional de Hidrógeno.

Ministerio de Energía. (s. f.-a). *H2V Hidrógeno Verde: Un Proyecto País*. 14. Recuperado 10 de septiembre de 2024, de https://energia.gob.cl/sites/default/files/guia_hidrogeno_abril.pdf

Ministerio de Energía. (s. f.-b). *Plan de Acción de Hidrógeno Verde*. Planhidrogenoverde.cl.

Recuperado 10 de septiembre de 2024, de <https://www.planhidrogenoverde.cl/>

Ministerio del Medioambiente. (s. f.). *Negociación Internacional*. Gob.cl. Recuperado 10 de

septiembre de 2024, de <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/negociacion-internacional/>

Mike. (s. f.). *Diesel price index*. Businessanalytiq. Recuperado 11 de septiembre

de: <https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/diesel-price-index/2024>, de [https](https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/diesel-price-index/2024)

NASA Global Climate Change (s.f.). Global Temperature. [https://climate.nasa.gov/vital-](https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/)

[signs/global-temperature/](https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/)

NatGeoES. (Abril de 2022). *Explicación de qué son los combustibles fósiles*. National

Geographic. [https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/explicacion-que-son-](https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/explicacion-que-son-combustibles-fosiles)

[combustibles-fosiles](https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/explicacion-que-son-combustibles-fosiles)

Niermann, M., Beckendorff, A., Kaltschmitt, M., y Bonhoff, K. (2019). Liquid Organic Hydrogen

Carrier (LOHC) – Assessment based on chemical and economic properties. *International*

Journal of Hydrogen Energy, 44(13), 6631–6654.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.199>

Nuevo, D. (Noviembre de 2022). *Los países líderes en hidrógeno a nivel mundial*. eshidrogeno.

<https://eshidrogeno.com/paises-lideres-en-hidrogeno/>

Nunez, C. (Junio de 2023). Explicación de qué son los combustibles fósiles. *National*

Geographic. Recuperado el 04 de septiembre de 2023 de

[https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/explicacion-que-son-](https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/explicacion-que-son-combustibles-)

[combustibles-](https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/explicacion-que-son-combustibles-)

fosiles#:~:text=Las%20emisiones%20de%20di%C3%B3xido%20de,encima%20de%20los%20niveles%20preindustriales

OECD. (s. f.). *Australia*. Observatorio de Complejidad Económica. Recuperado 10 de septiembre de 2024, de <https://oec.world/es/profile/country/aus>

O'Reilly, C. (2024, mayo 15). *CIC inks non-binding green hydrogen agreement with GE Vernova*. Global Hydrogen Review.
<https://www.globalhydrogenreview.com/hydrogen/15052024/cic-inks-non-binding-green-hydrogen-agreement-with-ge-vernova/>

Pande, N. (2023, junio 27). Hydrogen infrastructure. *Green H2 World*.
<https://www.greenh2world.com/post/hydrogen-infrastructure>

Pattabathula, V., Nayak, R., & Timbres, D. (s. f.). *Ammonia storage tanks*.
Ammoniaknowhow.com. Recuperado 10 de septiembre de 2024, de
<https://ammoniaknowhow.com/ammonia-storage-tanks/>

Petróleo OPEP. (2024, septiembre 10). *Precio del petróleo OPEP por barril*. Datosmacro.com.
<https://datosmacro.expansion.com/materias-primas/opec>

Portal Minero. (27 de enero de 2023a). Escasez hídrica impulsa el desarrollo de plantas desaladoras en Chile. *Portal Minero*. <https://www.portalminero.com/wp/escasez-hidrica-impulsa-el-desarrollo-de-plantas-desaladoras-en-chile>

Portal Minero. (5 de diciembre de 2023b). SEA participó en seminario sobre oportunidades y desafíos de las plantas desaladoras en Chile. *Portal Minero*.

<https://www.portalminero.com/wp/sea-participo-en-seminario-sobre-oportunidades-y-desafios-de-las-plantas-desaladoras-en-chile/>

Puerto San Antonio. (2022). *Empresa Portuaria San Antonio: Reglamento de los servicios*.

Puertosanantonio.com.

https://www.puertosanantonio.com/psa/site/docs/20200706/20200706152239/manual_de_servicio_epsa_abril_2022.pdf

Raman, R., Nair, V. K., Prakash, V., Patwardhan, A., & Nedungadi, P. (2022). *Green-hydrogen research: What have we achieved, and where are we going? Bibliometrics analysis*. Energy Reports, 8, 9242–9260. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.07.058>

Redacción. (12 de marzo de 2021). *Australia comienza a producir hidrógeno a partir del carbón*. El Periódico de la Energía. <https://elperiodicodelaenergia.com/australia-comienza-a-producir-hidrogeno-a-partir-del-carbon/>

Rystad Energy. (7 de febrero de 2023). *Green hydrogen: technology breakthroughs*. Rystad Energy. <https://www.rystadenergy.com/news/green-hydrogen-technology-breakthroughs-mean-iridium-shortage-and-high-prices-wil>

Sanhueza, B. (Diciembre 2022). *Estudio de la optimización de logística en la producción, almacenamiento y exportación de hidrógeno verde en Chile*. (Memoria de título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Químico). Universidad de Concepción. Concepción, Chile.

- Santodomingo, A. (s. f.). *AMMONIA TRANSPORT & STORAGE*. 7-10. Recuperado 10 de septiembre de 2024, de https://ptx-hub.org/wp-content/uploads/2024/01/International-PtX-Hub_202401_Ammonia-transport-and-storage.pdf
- Seo, Y., An, J., Park, E., Kim, J., Cho, M., Han, S., & Lee, J. (2024). Technical–economic analysis for ammonia ocean transportation using an ammonia-fueled carrier. *Sustainability*, 16(2), 11. <https://doi.org/10.3390/su16020827>
- SII. (s. f.). *NUEVA TABLA DE VIDA ÚTIL DE LOS BIENES FÍSICOS DEL ACTIVO INMOVILIZADO*. Sii.cl. Recuperado 10 de septiembre de 2024, de https://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/tabla_vida_enero.htm
- Si, K. (15 de agosto de 2024). *Jaldhi venturing into very large ammonia carriers*. Seatrade-maritime.com. <https://www.seatrade-maritime.com/tankers/jaldhi-venturing-into-very-large-ammonia-carriers>
- Smink, V. (31 de marzo de 2021). Hidrógeno verde: 6 países que lideran la producción de una de las «energías del futuro» (y cuál es el único latinoamericano). *BBC*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-56531777>
- Solunion. (25 julio de 2022). *¿Cuáles son las principales exportaciones de Chile?* Solunion Chile. <https://www.solunion.cl/blog/cuales-son-las-principales-exportaciones-de-chile/>
- Sostenibilidad para todos. (s.f). *El impacto ambiental de las energías NO renovables: cambio climático y más*.
- The oxford institute for energy studies. (Septiembre 2022). Global trade of hydrogen: what is the best way to transfer hydrogen over long distances?.

Victoria State Government. (6 de septiembre de 2023). *Desalination history*. Water.vic.gov.au.
<https://www.water.vic.gov.au/water-sources/desalination/desalination-history>

Zavia, M. (16 de abril de 2024). *Australia tiene una solución para vender hidrógeno más barato: transportarlo en polvo*. Xataka.com; Energía. <https://www.xataka.com/energia/australia-tiene-solucion-vender-hidrogeno-barato-transportarlo-polvo>

Ziprecruiter. (s. f.). *Professional Sailor Salary*. Ziprecruiter.com. Recuperado 11 de septiembre de 2024, de <https://www.ziprecruiter.com/Salaries/Professional-Sailor-Salary>