



COMITÉ SOLAR
E INNOVACIÓN ENERGÉTICA

CORFO



Chile
en marcha

hidrógeno verde

Estrategia para el mercado de Hidrógeno verde en Chile

Resumen ejecutivo del diagnóstico

Para talleres estrategia final



Julio
2019

hidrógeno verde

Estrategia para el mercado de Hidrógeno verde en Chile

Resumen ejecutivo del diagnóstico

Para talleres estrategia final



COMITÉ SOLAR
E INNOVACIÓN ENERGÉTICA

CORFO



Chile
en marcha

CONSULTORÍA:

“Construcción de una Estrategia para el desarrollo del mercado de hidrógeno verde en Chile a través de Acuerdos Público Privados”

PARA EL PROGRAMA ESTRATÉGICO NACIONAL INDUSTRIA SOLAR, CÓDIGO 15PEDN-57256-4.

EQUIPO CONSULTOR:

Cristián Yáñez O.
Stephan Franz
Nuria Hartmann
Katherine Martínez
Victor Fernández

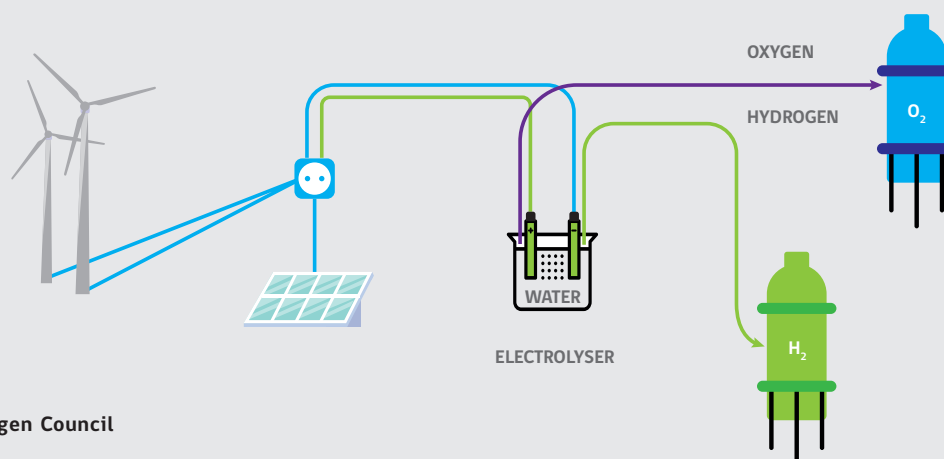
Corporación de Desarrollo Tecnológico e Investigaciones y Datos SpA



1. Resumen ejecutivo del diagnóstico

Las emisiones provenientes del sector de energía aportan alrededor de un 77% a las emisiones nacionales de Chile (Ministerio de Energía 2017), por ende la descarbonización de este sector es clave para la mitigación de gases de efecto invernadero (GEI) en el país. Un enfoque muy prometedor para enfrentar el desafío de una descarbonización de la matriz energética del país, es el de aprovechar la abundancia y los bajos costos de las fuentes de energías renovables no convencionales (ERNC) del país, para la generación de electricidad a precios muy competitivos. La electricidad generada mediante fuentes de ERNC no solamente sirve para el suministro eléctrico sino también para producir el gas hidrógeno (H₂), un vector energético que permite múltiples diferentes usos. La producción de H₂ actualmente es basada, en un 95%, en procesos térmicos mediante hidrocarburos (gas natural, gas licuado de petróleo o nafta), un proceso con emisiones CO₂. Sin embargo, también existe la posibilidad de producir H₂ mediante el proceso de electrólisis, cuyos insumos solamente son electricidad y agua. En este proceso, que es llevado a cabo mediante un electrolizador, una corriente de electricidad es aplicada a agua y el H₂ es separado en oxígeno (O₂) e hidrógeno (H₂):

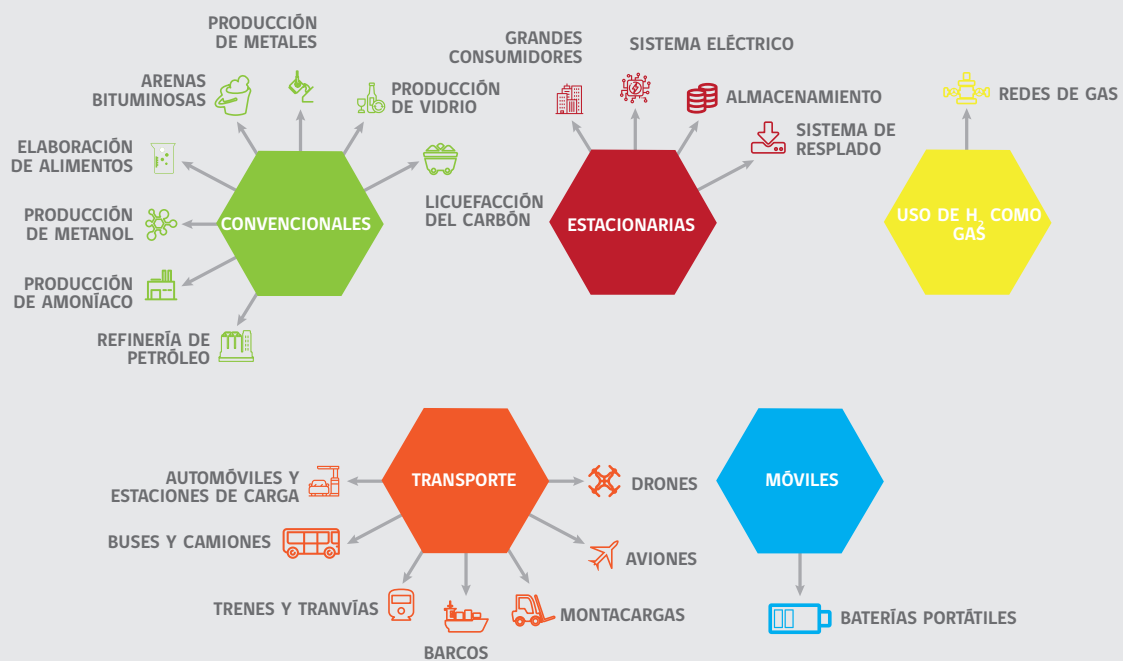
ILUSTRACIÓN 1: PROCESO DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO MEDIANTE ELECTRÓLISIS



Fuente: Hydrogen Council

Al ocupar electricidad generada mediante ERNC, la producción de hidrógeno no emite emisiones CO₂, por ende su producción es "verde". El hidrógeno verde generado mediante este proceso, es muy versátil en cuanto a sus posibles aplicaciones: sirve como materia prima industrial (entre otros, como insumo para la producción de vidrio, de metales, alimentos como margarina, procesos de refinación de petróleo); para suministro de calor (aplicado en forma pura o mezclado con gas natural o para la producción de metano más limpio); como combustible para fines de movilidad en diversos sectores de transporte, mediante celdas de combustible que convierten el gas H₂ en electricidad; para la producción de amoníaco (NH₃) más limpio como insumo de la producción de fertilizantes y explosivos. Y, el H₂ verde sirve para almacenar energía en grandes cantidades sobre plazos de tiempo largos, por ejemplo inyectándolo a redes de gas natural existentes, para estabilizar el suministro energético, cuya volatilidad de oferta ha aumentado debido a una creciente cantidad de ERNC en la matriz eléctrica.

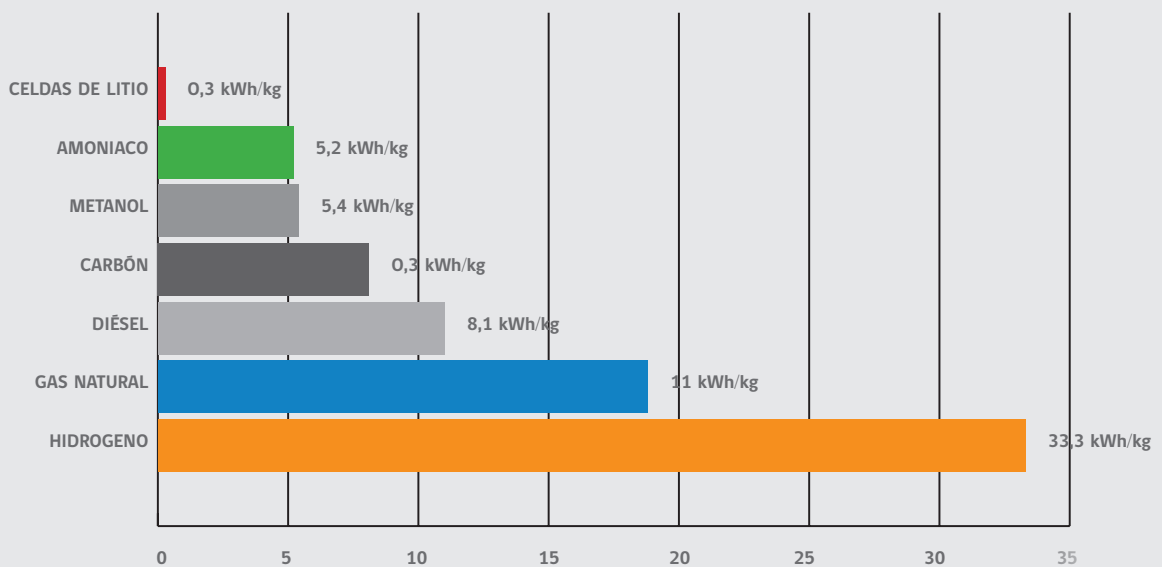
ILUSTRACIÓN 2: APLICACIONES DE HIDRÓGENO



Fuente: GIZ (2019)

Los principales beneficios de una aplicación de hidrógeno verde en estos diferentes sectores son: el reemplazo de combustibles fósiles con emisiones CO₂, por ende una descarbonización de los respectivos sectores donde se aplique y, debido a este reemplazo, una independencia de importaciones de combustibles fósiles de otros países. En caso de aplicar hidrógeno verde como insumo a la movilidad, mediante celdas de combustible, además una mayor autonomía de los respectivos medios de transporte en comparación con combustibles fósiles convencionales, debido a que el hidrógeno tiene una densidad energética gravimétrica muy alta (tres veces mayor que la de diésel):

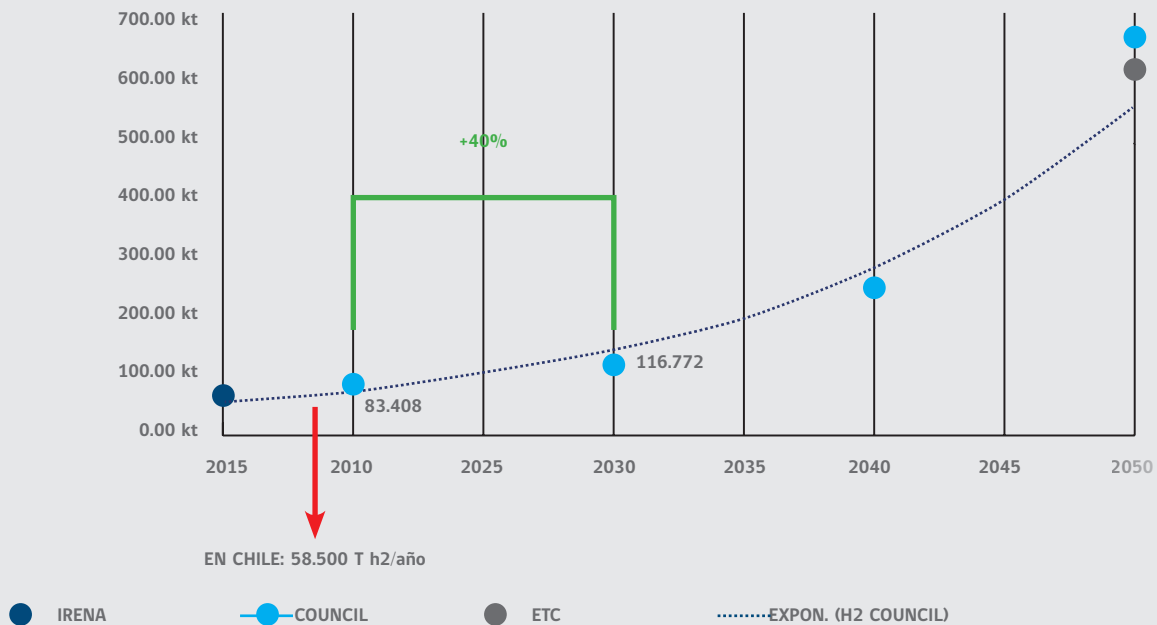
ILUSTRACIÓN 3: DENSIDADES ENERGÉTICAS GRAVIMÉTRICAS (KWH/KG) EN COMPARACIÓN



Fuentes: LEHMANN 2014, p. 75; FRAUNHOFER ISI, 2015 p.11.

Actualmente, muchos países a nivel global están considerando el hidrógeno como una buena alternativa al uso de combustibles fósiles para descarbonizar sus matrices energéticas y volverse sociedades más sostenibles. Ya existen las tecnologías para su producción, sin embargo aún se requieren economías de escala para que ésta se vuelva económicamente factible. Las ambiciosas metas de producción y aplicación de hidrógeno (verde) y altas inversiones financieras que están haciendo los gobiernos de Japón, Australia y Corea del Sur, entre otros, en este contexto, están marcando el ritmo del desarrollo de este mercado a nivel internacional. Es así que varias entidades internacionales proyectan un alto crecimiento del mercado global de H₂, desde los actuales 83,4 MMt (2.200 TWh) según (IRENA 2018), a 116,72 MMt al 2030:

ILUSTRACIÓN 4: CRECIMIENTO DEL MERCADO DE H₂ ESTIMADO A NIVEL GLOBAL



Fuentes: IRENA 2018, p. 31; HYDROGEN COUNCIL 2017, p. 20; ETC 2018, p. 22.

En cuanto al desarrollo de los precios de hidrógeno, a nivel global se espera una reducción y factibilidad económica para su aplicación en varios sectores alrededor del año 2030.

¿Por qué el hidrógeno verde es una oportunidad de mercado prometedora para Chile?

Chile, debido a su enorme y conocido potencial de diversas fuentes de ERNC a lo largo del país, que asciende a 1.384 GW (Ministerio de Energía 2019), tiene una ventaja comparativa muy alta en cuanto a otros países: los precios de producción de energía renovable relativamente bajos, sobre todo del recurso solar debido a su alta irradiación, y recurso eólico debido a atractivas ubicaciones costeras y en altura con mucho viento, permiten que Chile se pueda convertir en un productor de hidrógeno verde a gran escala, para por un lado descarbonizar su propia matriz energética y volverse menos dependiente de la importación de combustibles fósiles, y por otro lado, proveer hidrógeno a países como Japón cuya demanda por este vector energético está planificada.

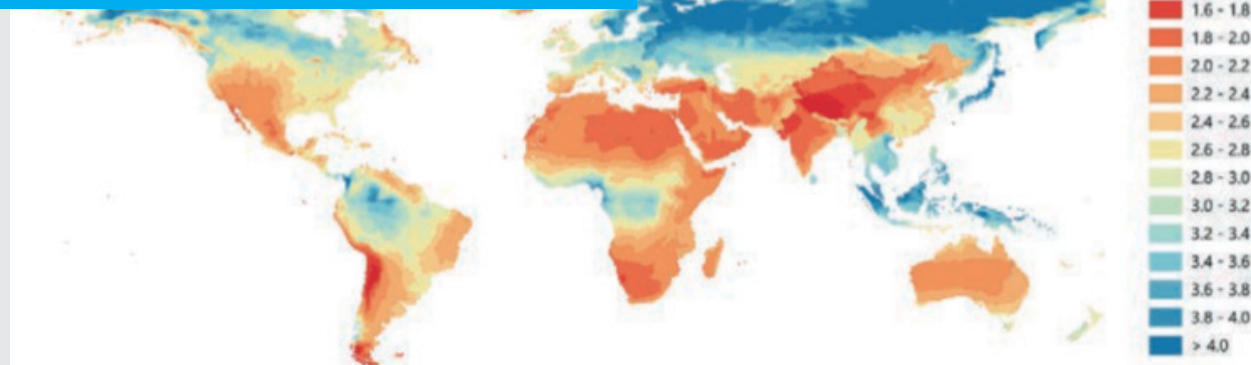
Según muestran los dos siguientes gráficos elaborados por la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2019), en Chile se puede producir H2 verde mediante electrólisis con fuentes renovables al precio más bajo, niveles solamente compartidos con China e India:

ILUSTRACIÓN 6: COSTOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO EN COMPARACIÓN (EN VERDE: PRODUCCIÓN MEDIANTE ELECTRÓLISIS CON ELECTRICIDAD RENOVABLE)



Fuentes: IEA (2019).

ILUSTRACIÓN 7: COSTOS DE HIDRÓGENO PRODUCIDO EN PLANTAS HÍBRIDAS DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA Y EÓLICA A LARGO PLAZO

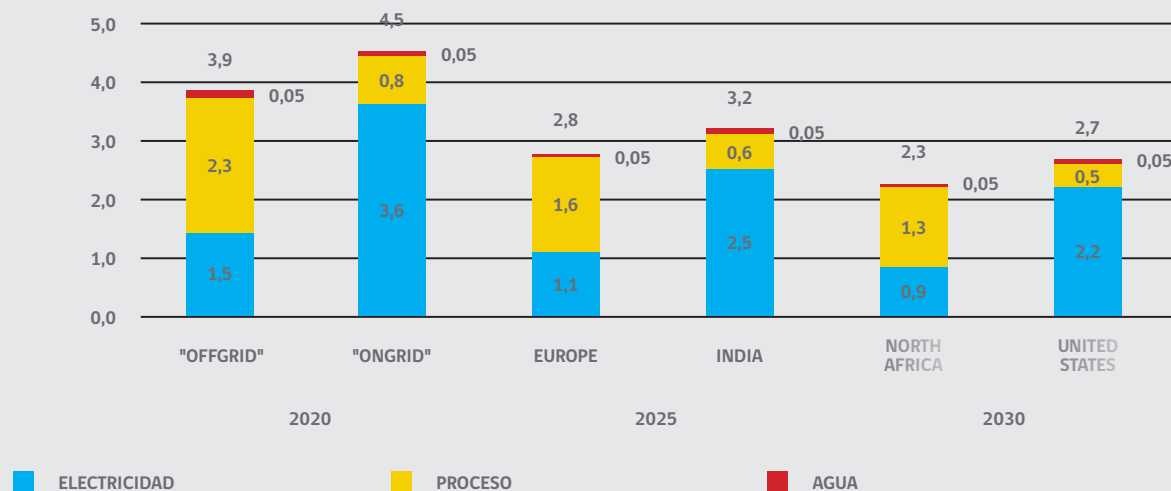


Notes: This map is without prejudice to the status of or sovereignty over any territory, to the delimitation of international frontiers and boundaries and to the name of any territory, city or area. Electrolyser CAPEX = USD 450/kW_{el}, efficiency (LHV) = 74%; solar PV CAPEX and onshore wind CAPEX = between USD 400–1 000/kW and USD 900–2 500/kW depending on the region; discount rate = 8%.

Source: IEA analysis based on wind data from Rife et al. (2014), NCAR Global Climate Four-Dimensional Data Assimilation (CFDDA) Hourly 40 km Reanalysis and solar data from renewables.ninja (2019).

Para Chile, según cálculos realizados en el marco de esta consultoría, se proyectan las siguientes precios de producción de H₂ verde (USD/kg), diferenciando entre una planta de producción (electrolizador) conectada a la red eléctrica (ongrid) y fuera de la red (offgrid): Ilustración 21: Foto a la izquierda: El prototipo de Novatec Solar con una barra que acopla varias filas de espejos (fuente: sitio web de Novatec Solar, consultado el 18 de septiembre de 2014). Foto a la derecha: Feranova: cada fila de espejos tiene su propio motor (fuente: sitio web de Feranova GmbH, consultado el 10 de octubre de 2012).

ILUSTRACIÓN 8: PROYECCIÓN DE LOS PRECIOS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE BASADO EN ERNC EN CHILE



Fuentes: ELABORACIÓN PROPIA

Según indica el gráfico, el principal factor que determina el costo del hidrógeno verde es el costo de electricidad, que se muestra más bajo en caso de tener plantas de producción no conectadas a la red, debido a que no implican costos de transmisión y servicios complementarios como componentes existentes en el precio de electricidad de la red. Otro beneficio de producir H₂ verde mediante una planta de producción offgrid es, que debido al uso de electricidad 100%, el factor de emisiones es nulo, en contrario al factor de emisión que presenta la red eléctrica nacional, la que actualmente aún es alimentada por fuentes de energía fósiles y por ende no es 100% renovable. El precio del agua es la componente con menor influencia en el precio productivo, ya que solamente se requieren alrededor de 8.9 l de agua/kg H₂.

Con H₂ verde reemplazando combustibles fósiles, los procesos de hidrotreatmento de combustibles en las refinerías del país podrían ocurrir de forma menos intensa en emisiones CO₂, lo mismo en caso de procesos industriales metalúrgicos y de producción de vidrios y de alimentos. Una mezcla del gas natural en centrales de gas con hidrógeno (co-firing) contribuiría a descarbonizar la matriz energética, al igual que el uso de hidrógeno como combustible para medios de transporte, como ya lo está promocionando el estado de California en EE.UU., sobre todo para fines de larga distancia y carga pesada. Otra aplicación muy relevante se daría en la minería.

El creciente porcentaje de ERNC en la matriz energética aumenta la volatilidad de la oferta, debido a fases con menor (o nula) irradiación solar o menor viento, y a veces la oferta también supera la demanda. Para aprovechar la energía generada y no perderla, y para crear reservas para eventuales brechas en la oferta, se requieren soluciones de almacenamiento de energía. Una solución puede ser almacenar hidrógeno en ductos de gas (infraestructura existente) o cavidades subterráneas, esto permite guardar energía en grandes cantidades y a largo plazo. Este denominado proceso Power-to-Gas es estudiado en varios países, sobre todo en cuanto a posibles porcentajes de mezcla de H₂ con GN para el suministro regular de gas, que actualmente oscilan alrededor de 10% con énfasis de aumentar este porcentaje a 20% (por ejemplo, en Alemania).

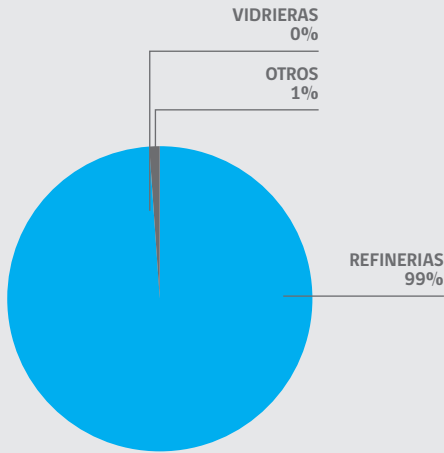
Otro factor importante que hace muy atractiva la producción de hidrógeno verde en Chile es la gran demanda de amoníaco (NH₃) en la Región Latinoamericana, que se utiliza principalmente (88% a nivel mundial) para la producción de fertilizantes para la agricultura. Para la producción de Amoníaco, uno de los químicos sintéticos que más se fabrica en el mundo, se requiere hidrógeno. También la producción de explosivos para la minería exige NH₃. La principal empresa productora de explosivos, Enaex, actualmente está importando 360.000 t de NH₃/año de países como Trinidad y Tobago, Caribe. Esta importación se podría reemplazar por una producción nacional de NH₃ mediante hidrógeno verde producido en Chile. La exportación de amoníaco verde o fertilizantes se abre para Chile. Además, el amoníaco es un buen medio de transporte de H₂, debido a que la licuefacción de NH₃ a -33°C ocurre a temperaturas menos bajas que la de H₂ (-252 °C) y que las tecnologías existen.

Un reciente estudio de la IEA (Armijo, J., mayo 2019) demostró el alto potencial de plantas híbridas solar-eólicas para producir hidrógeno y amoníaco verde, basado en detallados análisis de modelación con ubicación en Taltal, Calama, Patagonia chilena y argentina. Según éstos, este tipo de plantas híbridas pueden producir NH₃ verde a precios nivelados de amoníaco (LCOA) 5% menores y H₂ verde podría ser producido a costos en rangos de 1.96 - 2.35 USD/kg H₂, menores que alternativas de producción tradicionales basadas en combustibles fósiles (Armijo, J., mayo 2019).

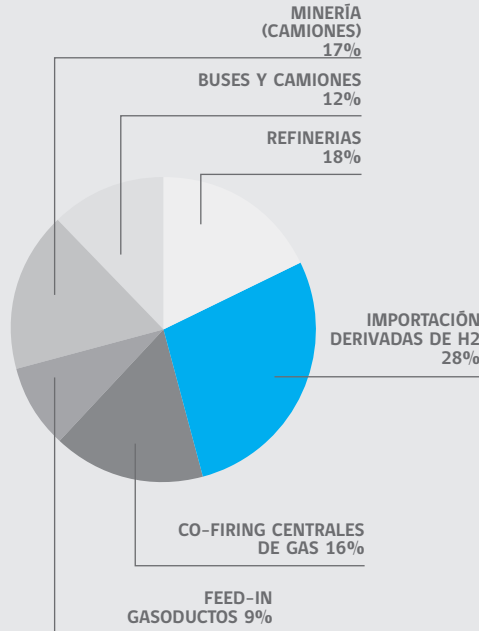
Tomando en cuenta todas estas potenciales aplicaciones y demandas por hidrógeno verde mencionadas, y asumiendo escenarios de crecimiento de demanda y de inversión en tecnologías innovadoras de forma realista, en marco del presente proyecto se estimó un crecimiento de mercado nacional hacia el año 2030/35 con un significativo potencial:

ILUSTRACIÓN 8: PROYECCIONES DE CRECIMIENTO DEL MERCADO DE HIDRÓGENO VERDE PARA CHILE

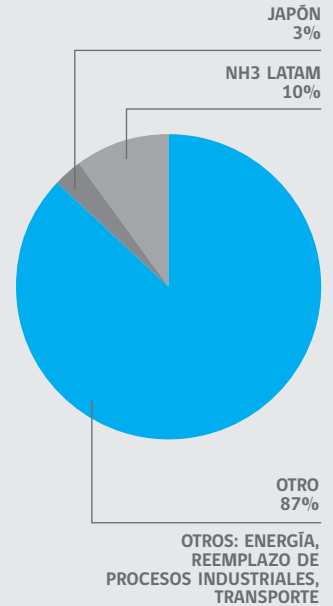
MERCADO NACIONAL AÑO 2019



POTENCIAL ESTIMADO MERCADO NACIONAL H2 VERDE (2030 - 2035)



POTENCIAL MERCADO INTERNACIONAL DEL H2 VERDE A CAPTURAR POR CHILE (2030 - 2035)



X 6 VECES

X 12 VECES

2019	2030 NACIONAL	2030 INTERNACIONAL
58.500 tH2/año 123 MMUSD/año 2019 ASUMIENDO COSTO DE 2,1 USD/kgH2	325.615 tH2/año 684 - 749 MMUSD/año AL 2030 (VALOR DE MERCADO PRODUCIDO) ASUMIENDO COSTO DE 2,1 - 2,3 USD/kgH2	3.850.000 tH2/año 8.081 - 8.851 MMUSD AL 2030 (VALOR DE MERCADO PRODUCIDO) ASUMIENDO COSTO DE 2,1 - 2,3 USD/kgH2
INSTALACIÓN FV HOY: CERO (2,4 GWp EN SEN)	INSTALACIÓN CAPACIDAD FV ADICIONAL REQUERIDA: 7,1 GWp (4.700 MM USD ASUMIENDO CAPEX FV DE 657 USD/kWp)	INSTALACIÓN CAPACIDAD FV ADICIONAL: 84,4 GWp (55.000 MM USD ASUMIENDO CAPEX FV DE 657 USD/kWp)*

* Comparación / dimensión con minería: cartera de proyectos con inversión de 65.747 millones de USD de 2018 hasta 2027 (Fuente: Ministerio de Minería)

Según esta estimación, el actual mercado nacional de 58.500 t de H₂/año, demandado en un 99% por la industria petrolera de refinería, podría crecer a unas 325.615 t de H₂/año en 2030, asumiendo, por ejemplo, un 10% de reemplazo de los camiones de extracción minera (CAEX) convencionales en la minería por equipos con motores duales de combustible diésel e hidrógeno, y otros supuestos por cada sector, según indica la siguiente tabla:

TABLA 1: ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL TÉCNICO NACIONAL DE HIDRÓGENO VERDE POR SECTOR HASTA 2030/35

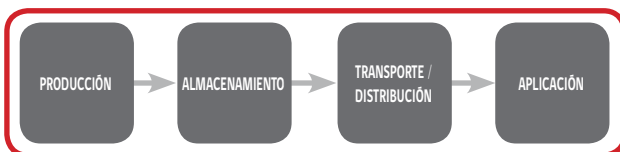
APLICACIONES	TOTAL MERCADO NACIONAL	PENETRACIÓN ESTIMADA			MMUS\$	
	GWh / año	%	GWh / año	t / año		
REFINERIA	1.950	100%	1.950	58.506	123	
IMPORTACIÓN DERIVADOS DE H ₂	3.000	100%	3.000	90.009	189	NH ₃ para fertilizantes y nitrato de amonio
CO-FIRING CENTRALES DE GAS	29.379	6%	1.763	52.887	111	Se consideran límites dados por gasoductos sin mayor inversión
FEED-IN GASODUCTOS	17.000	6%	1.020	30.603	64	Se consideran límites dados por gasoductos sin mayor inversión
MINERÍA (CAMIONES)	18.478	10%	1.848	55.440	116	Consideran un 20% de penetración
BUSES Y CAMIONES	12.722	10%	1.272	38.170	80	Consideran un 15% de penetración
	82.529		10.853	325.615	684	

Fuentes: ELABORACIÓN PROPIA

En caso que Chile como país aspire responder una parte de la demanda mundial por hidrógeno, sobre todo por parte de Japón y la demanda por amoníaco (verde) de la Región, estas 325.615 t/H2 anuales podrían crecer unas 12 veces hasta 3,850 kt de H2/año (en 2030).

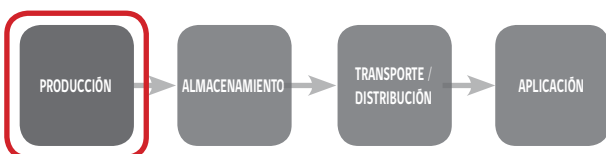
Los escenarios para una producción de H2 (y NH3) verdes en Chile, según demostrado, son prometedores. Sin embargo existen algunas brechas que se trata de sobrepasar para destrabar inversiones en proyectos de producción de hidrógeno verde. Las brechas identificadas en base a análisis literarios así como entrevistas con actores claves tanto nacionales como internacionales (Australia, California, Alemania) en general son parecidas entre Chile y nivel internacional, y existen tanto brechas transversales, a lo largo de la cadena de valor de hidrógeno, como también específicas según ámbito de ésta. A continuación se presentan las principales brechas:

Brechas transversales (a lo largo de cadena de valor)



- Falta de información para lograr el entendimiento del potencial del hidrógeno como vector energético
- Falta de Capital Humano capacitado (ingeniería, técnicos en manejo de H2)
- Falta de regulación específica sobre H2 (comercial, seguridad y funcionamiento)
- Desafíos técnicos en los sectores de aplicación (energía, transporte y materias primas)

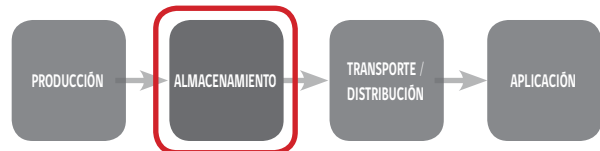
Brechas asociadas al proceso de producción



- Producción de H2 verde aún no es económicamente competitiva con producción de H2 de reformado SMR - medioambientalmente sí.
- Falta de pilotos de escala industrial de producción de hidrógeno verde en Chile para demostrar su factibilidad técnica y económica en sitios y aplicaciones de nicho que reduzcan riesgo de inversiones de gran escala.
- Se requieren electrolizadores de diferentes tamaños/capacidades

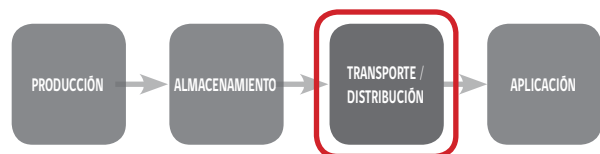
- Producción de H2 verde on-grid: factor de emisión de la red eléctrica define el carácter "verde" de la producción (lo hace "no tan verde")
- Producción de H2 verde off-grid: electrolizadores funcionan eficientemente en variabilidad de la generación eléctrica Corriente Continua

Brechas asociadas al almacenamiento



- Falta de análisis técnico económico y comercial de las opciones de almacenamiento a nivel nacional (por ejemplo: gaseoductos)
- Falta de proyectos piloto de escala industrial de almacenamiento para uso en sistemas eléctricos
- Falta definir porcentajes máximos de H2 verde que pueden ser inyectados a la red de GN

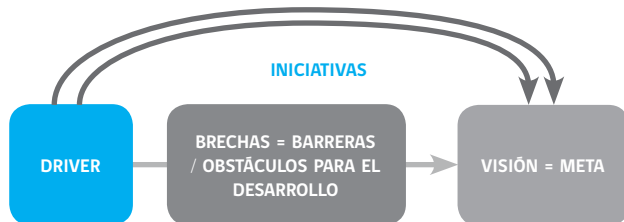
Brechas asociadas al transporte



- Costos de transporte mayores que costos de transporte de GN debido a métodos de transporte requeridos (compresión y tanques de alta presión pesados en caso de H2 gasificado; altos costos de licuefacción de H2)
- Barcos de transporte de hidrógeno intercontinentales aún en desarrollo
- Opciones tecnológicas existentes de transporte de H2 como amoníaco, metanol u otro requieren procesos de transformación en puertos de origen y destino incrementando los costos

Aparte, se identificaron una serie de brechas específicas según área de aplicación del H2, pero debido a que el foco de la visión nacional del desarrollo del mercado de H2 verde en Chile está en la producción y posible exportación de hidrógeno verde (y asociado con esto, su almacenamiento y transporte), se pone énfasis en las brechas mencionadas correspondientes a estos tres ámbitos.

Las brechas identificadas sirven como insumo a la orientación de iniciativas/proyectos que se definirán en los talleres, con el fin de aprovechar los drivers identificados (desarrollo sostenible; comparatividad y competitividad geográfica; aprovechamiento del potencial de ERNC etc), de manera de superar las brechas/barreras mencionadas para alcanzar la visión nacional de desarrollo de este mercado.



hidrógeno verde

Estrategia para el mercado de Hidrógeno verde en Chile

Resumen ejecutivo del diagnóstico

Para talleres estrategia final

