

Módulo: Hidrógeno Verde - ENAP

Profesor: Dr. Yunesky Masip
Escuela de Ingeniería Mecánica
PUCV



Presentación de Relator

- ✓ **Doctor en Ingeniería Industrial (PhD)** por la Escuela de Ingenieros de la Universidad de Navarra, España, **Ingeniero Mecánico** de la Universidad Tecnológica de la Habana, Cuba.
- ✓ Actualmente, **Subdirector y Profesor Adjunto en la Escuela de Ingeniería Mecánica** de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV).
- ✓ **Director de un Proyecto Anillo** denominado: “*Multidimensional study of the hydrogen value chain applications in the local industry*”, financiado por ANID y aplicado a la industria nacional, como es el caso de, **ENAP, Puerto Ventanas S.A., TPS, Angloamerican (Fundición Chagres), Polpaico BSA, Cooperativa Capel, Empresa de Celulosa y Papel**, entre otras.
- ✓ **Director Proyecto Bienes Públicos Corfo** – Hidrógeno Verde en la Región de Valparaíso Código 23BP-250993: “Plataforma Online Interactiva y Personalizable de Hidrógeno Verde (H2V) para la Región de Valparaíso”.
- ✓ **Investigador Responsable** del proyecto **Fondecyt Regular** denominado: “*RED-RES-GH2: Reducing the risk generated by extreme droughts in the Chilean power system with optimal shares of variable renewable energy sources including green hydrogen storage*”
- ✓ También ha participado en diversos **proyectos financiados por la ASE** sobre sistemas integrados de energías renovables no convencionales dentro de Chile.
- ✓ Participación en Conferencias Internacionales, Nacionales, Seminarios, Eventos Tecnológicos y Asesorías Técnicas sobre su área de trabajo.



Temas

- Introducción al hidrógeno verde y su importancia en la descarbonización.
- Producción de hidrógeno verde.
- Almacenamiento, transporte y distribución de hidrógeno verde.
- Potencial transformador del hidrógeno verde en la energía y la industria.
- Iniciativas como el proyecto Bien Público Corfo.





Antes de comenzar tu opinión es importante

👉 Instrucciones:

1. Responde las preguntas generales que se mostrarán a continuación (no toma más de 5 min.).
2. Usar el teléfono para escanear el código QR.
3. Los resultados se compartirán en vivo.

📊 Tu participación es clave para orientar las discusiones hacia las prioridades reales de ENAP.

¡Comencemos!



Mentimeter

O acceder a:

<https://www.mentimeter.com/>



**Gracias por sus respuestas en
Mentimeter.**

**Ahora usaremos una nueva herramienta
interactiva — Slido — para profundizar
otros temas y prioridades de acción.**





¿Cuál es su rol o área de trabajo?



¿Exposición previa a H₂V?



¿Cuáles considera que son las principales prioridades estratégicas de ENAP respecto al desarrollo del Hidrógeno Verde (H₂V)? Elija máximo 3 opciones



Desde su perspectiva, ¿Cuáles considera que son las principales oportunidades para ENAP en el desarrollo o participación dentro de la cadena de valor del Hidrógeno Verde (H₂V)?



¿Cuál es el horizonte de decisión de su área o unidad respecto a la implementación de proyectos relacionados con Hidrógeno Verde (H₂V)?



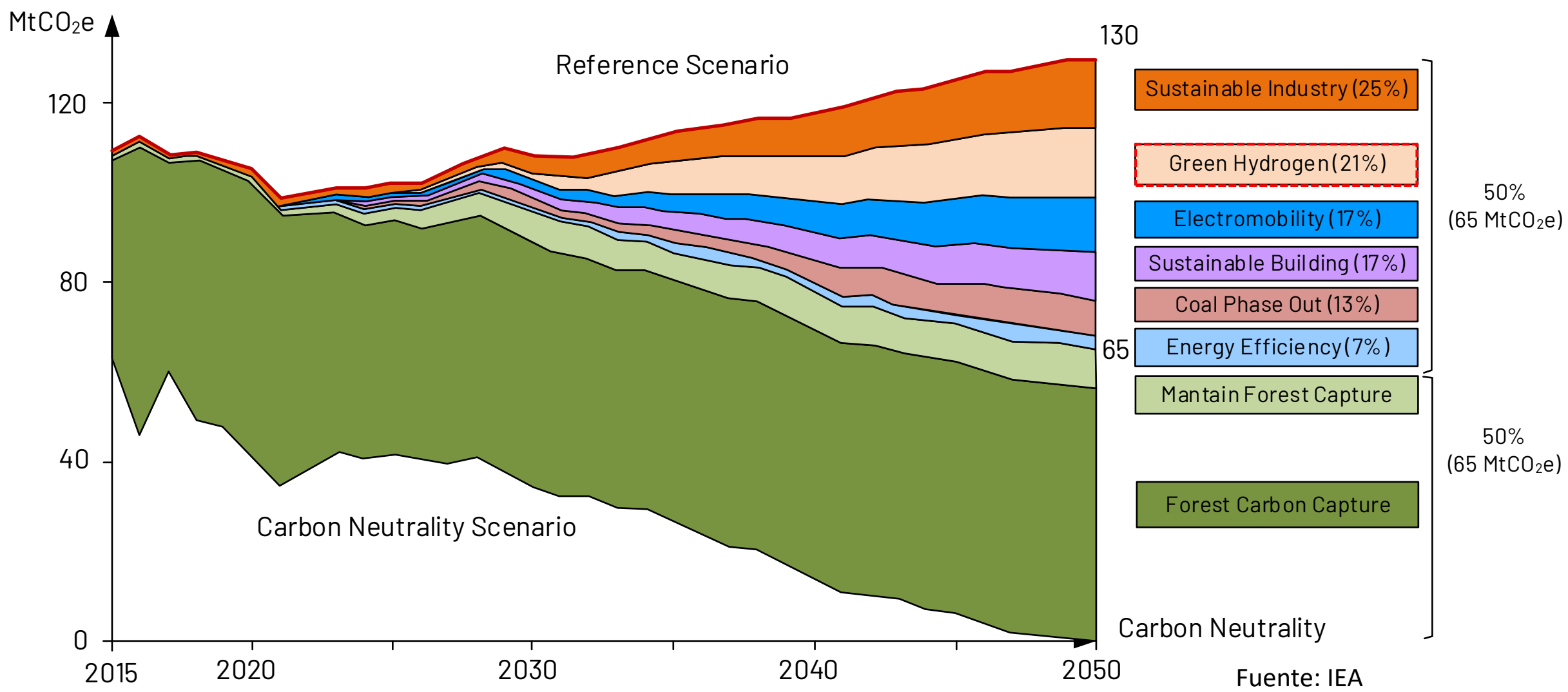
¿Qué riesgos o desafíos percibe como más relevantes para ENAP en la adopción o implementación de proyectos de Hidrógeno Verde (H₂V)?



¿Por qué H₂V y por qué ahora (ENAP & Chile)?

¿Por qué H₂V y por qué ahora (ENAP & Chile)?

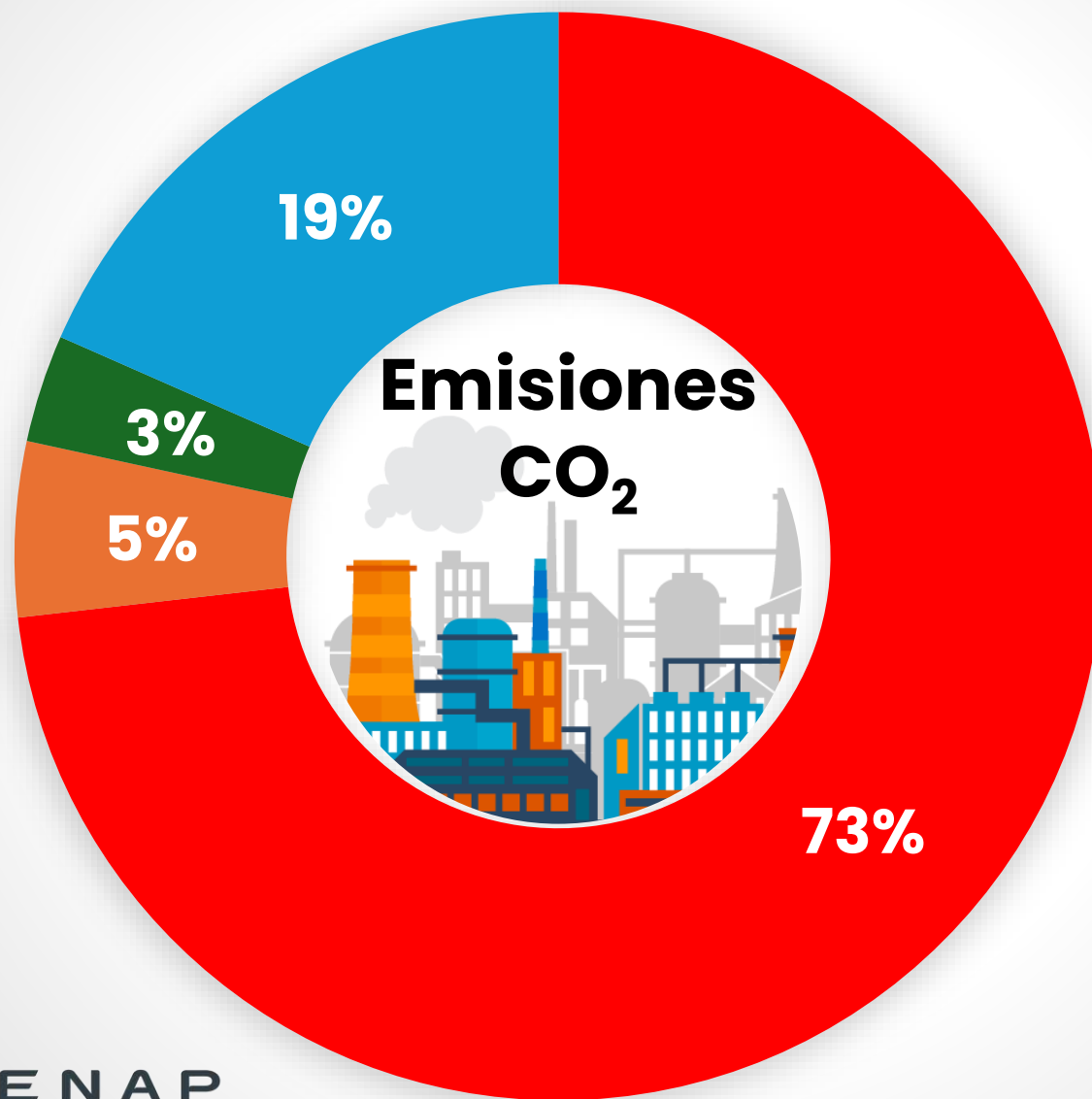
Carbon Neutrality 2050



¿Por qué el hidrógeno?



¿Por qué el hidrógeno?



73,2%

PROVIENE de la energía utilizada en electricidad, calor y transporte

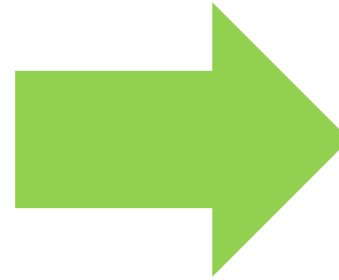
¿Por qué el hidrógeno?

¿Cuánta
energía
poseen 1 kg
de H_2 y de
gasolina?



1 kg de hidrógeno:

= 33,3 kWh



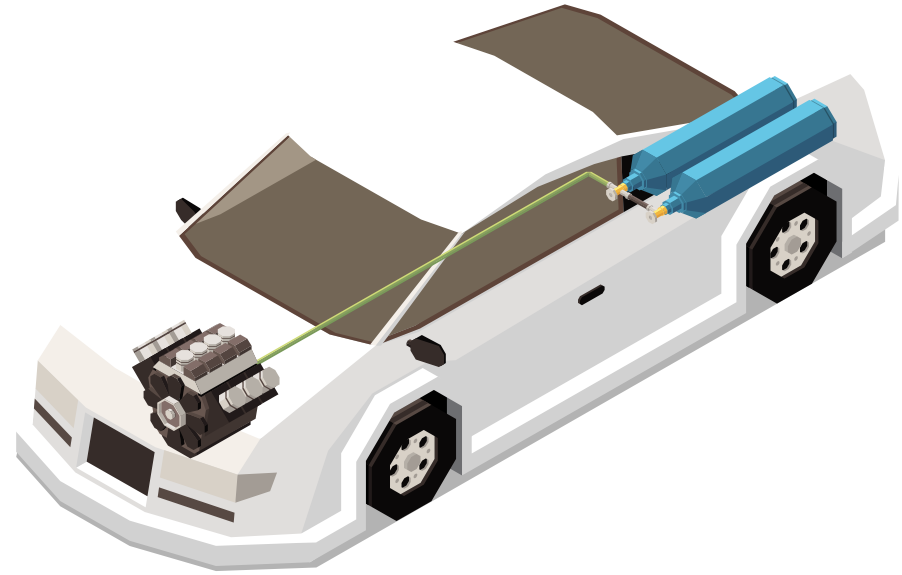
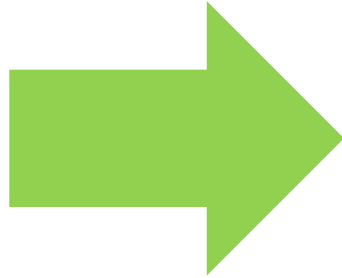
1 kg gasolina:

= 9,9 kWh

¿Por qué el hidrógeno?

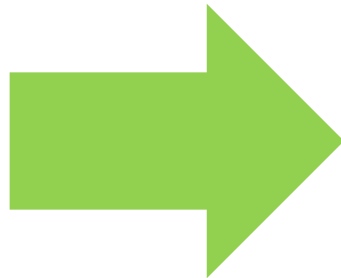


1 kg de hidrógeno



Permite recorrer
100 kilómetros

¿Por qué el hidrógeno?

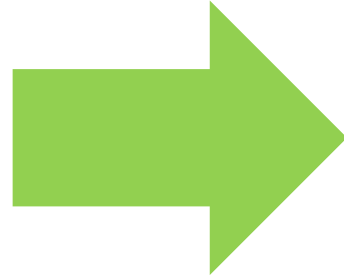
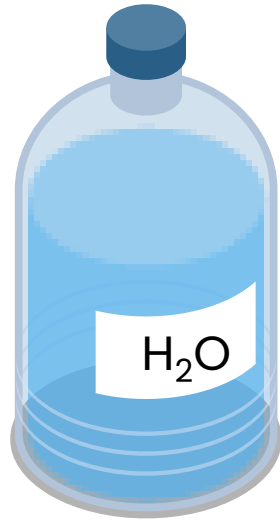


1 kg de hidrógeno

Permite abastecer
6 casas por un día

¿Por qué el hidrógeno?

¿Cuánta agua
se requiere
para producir
1 kg de H_2 ?



11 litros de agua

1 kg de hidrógeno

**¿Equivalente a qué procesos comunes o
industriales?**

¿Por qué el hidrógeno?



Lavavajillas

13 litros por lavado



Lavadora de 7 kg

42 litros por lavado



Regar un jardín de 5x5 m²

250 litros al día



100 litros
Ducha de 5 min



Piscinas pequeñas
(3 m de diámetro)

10.500 litros

¿Por qué el hidrógeno?

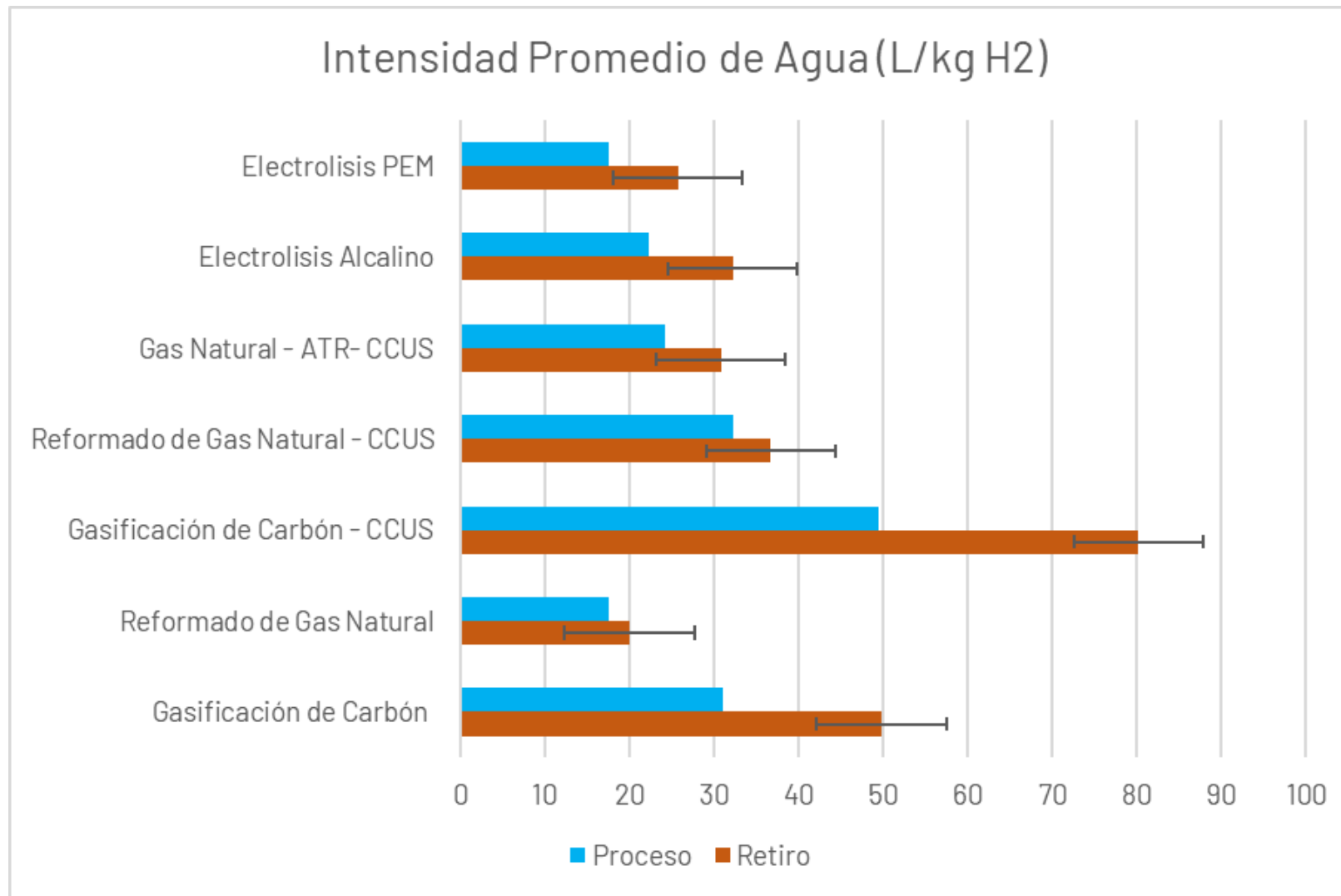
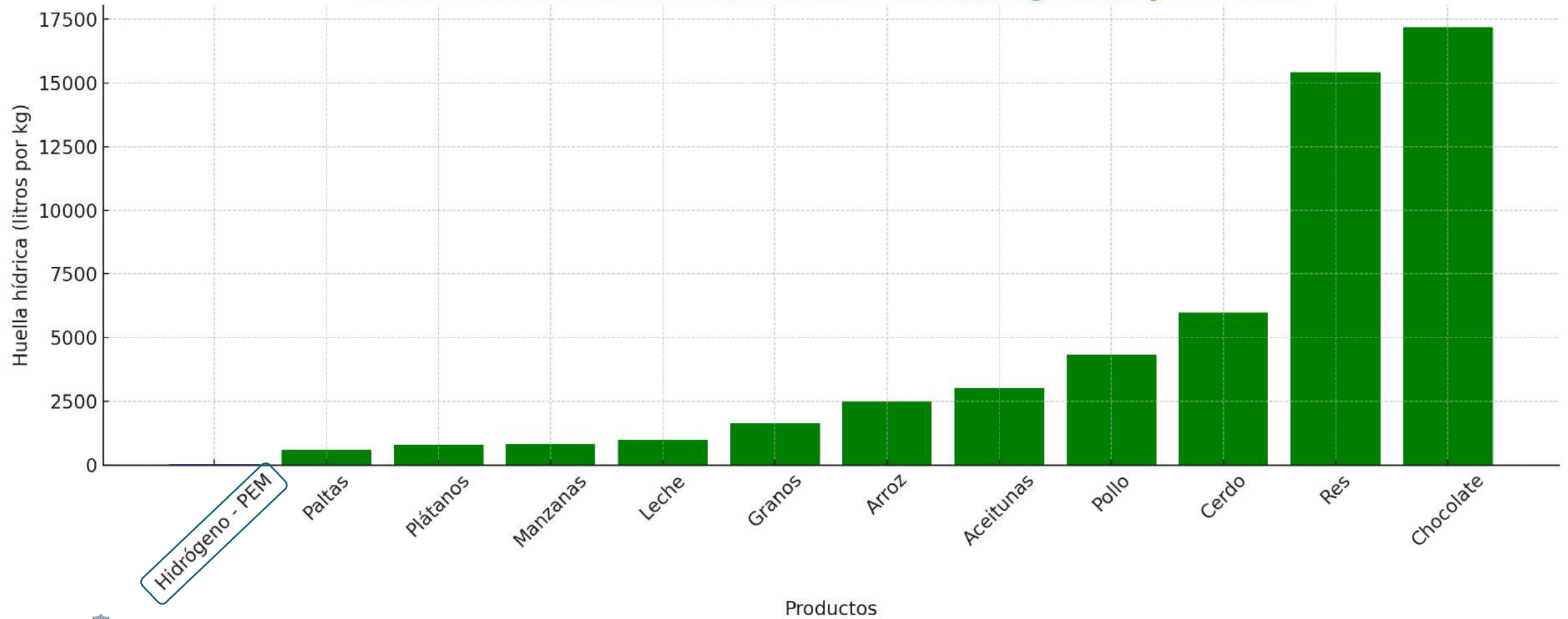


Gráfico que muestra la **intensidad del agua de varios métodos de producción de hidrógeno**. La gasificación de carbón tiene, con diferencia, la intensidad media de agua más alta, un 60 % más intensiva cuando está equipada con capacidades CCUS.

(Fuente [Agencia Internacional de Energías Renovables \(IRENA\)](#) y [Bluerisk](#))

¿Por qué el hidrógeno?

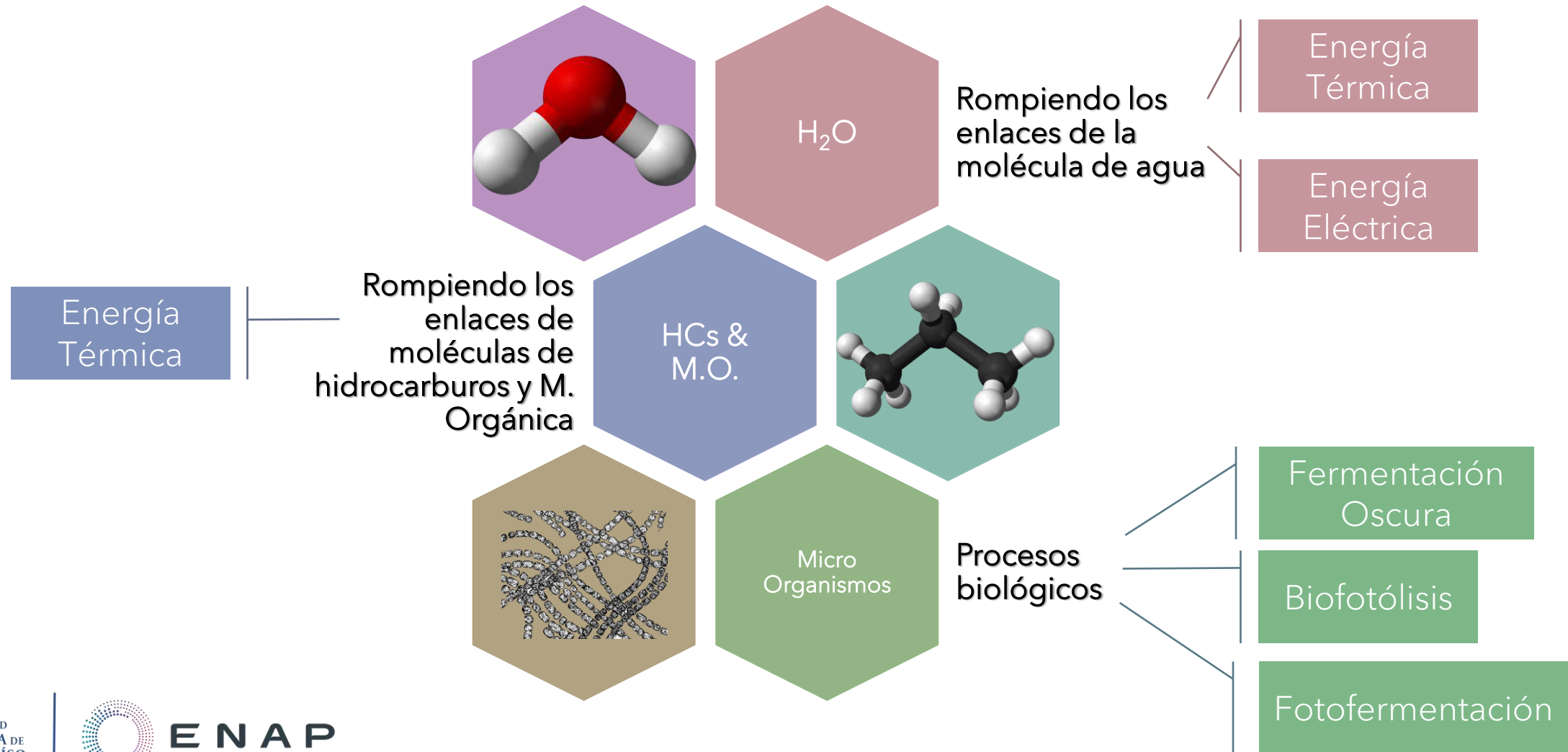
La Verdadera Huella Hídrica de los Productos Agrícolas y Animales



¿De dónde
obtenemos
el hidrógeno?

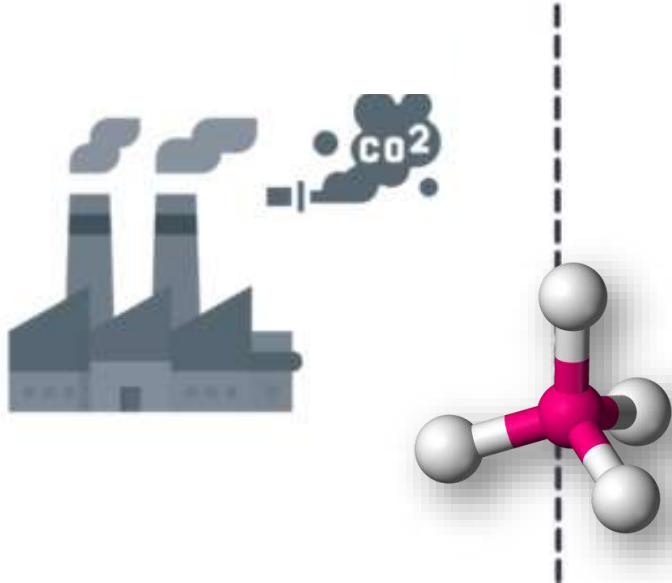


¿De donde obtenemos el hidrógeno?



¿De donde obtenemos el hidrógeno?

Hidrógeno gris



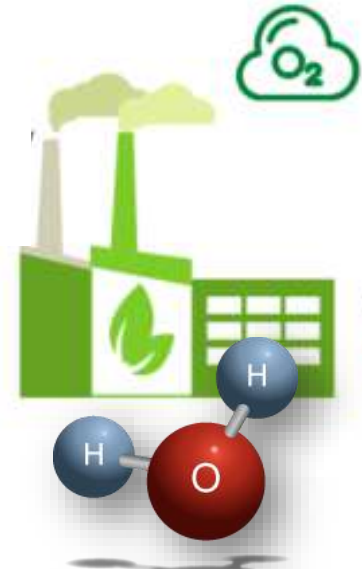
CO₂ emitido durante la conversión a combustible fósil (gas natural)

Hidrógeno azul



Captura y almacena CO₂

Hidrógeno verde



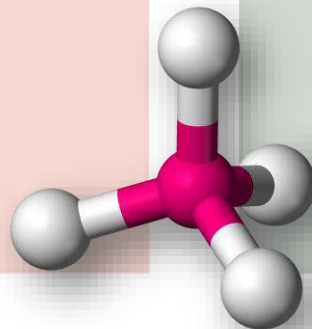
Cero emisiones

¿De donde obtenemos el hidrógeno?

Una forma de clasificarlo

H2 Gris

- *Fuente:* Gas Natural (metano) u otro combustible fósil.
- El carbono y sus “asociados” se liberan a la atmósfera



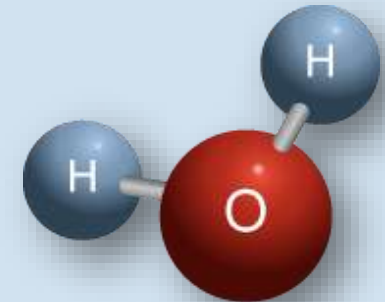
H2 Azul

- *Fuente:* Gas Natural (metano) u otro combustible fósil.
- El carbono y sus “asociados” se recoge y almacena.

PROCESOS TERMOQUÍMICOS

H2 Verde

- *Fuente:* **AGUA.**
- El proceso no libera contaminantes



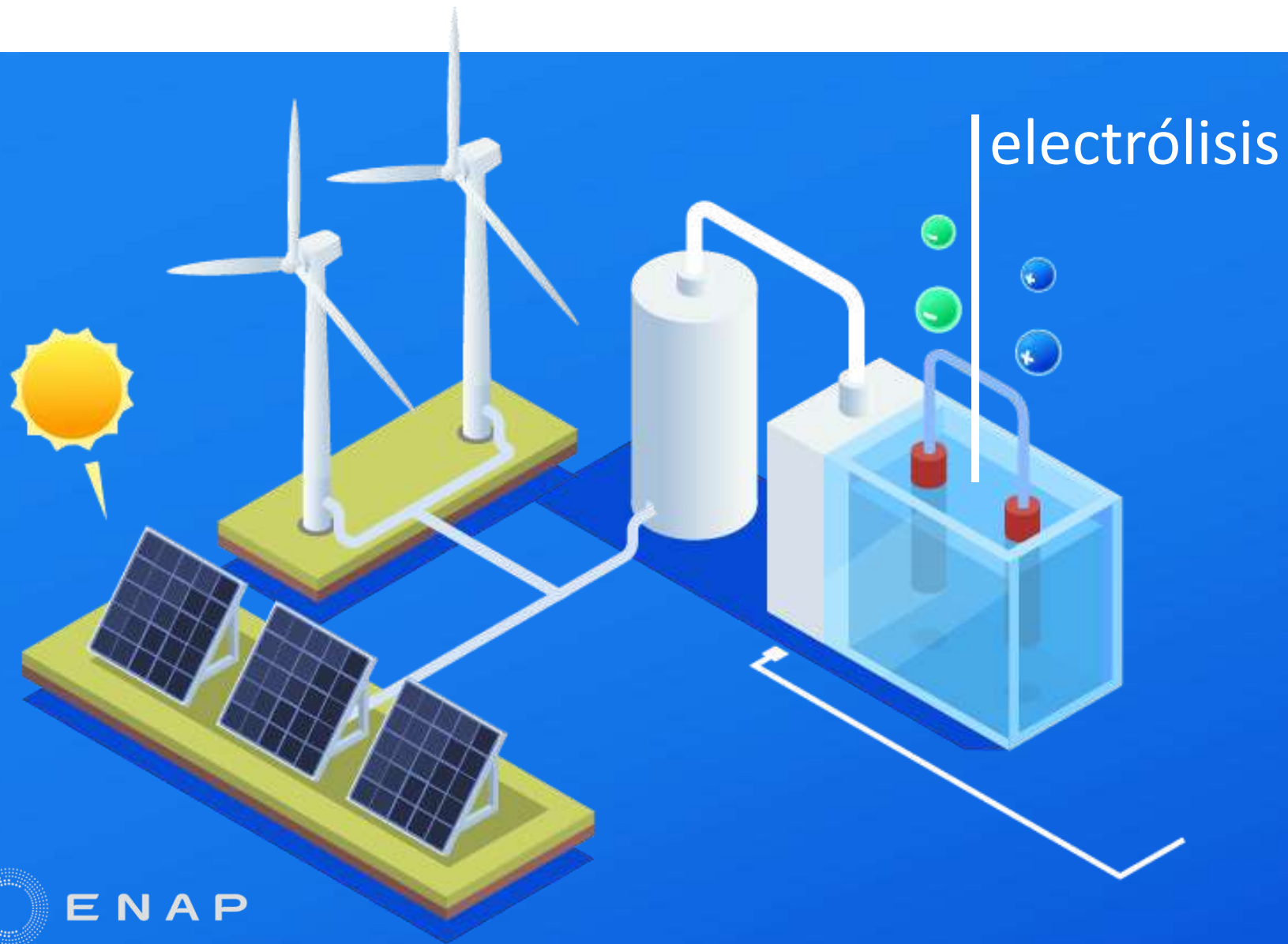
ELECTRÓLISIS

Pero... con electricidad de fuentes renovables

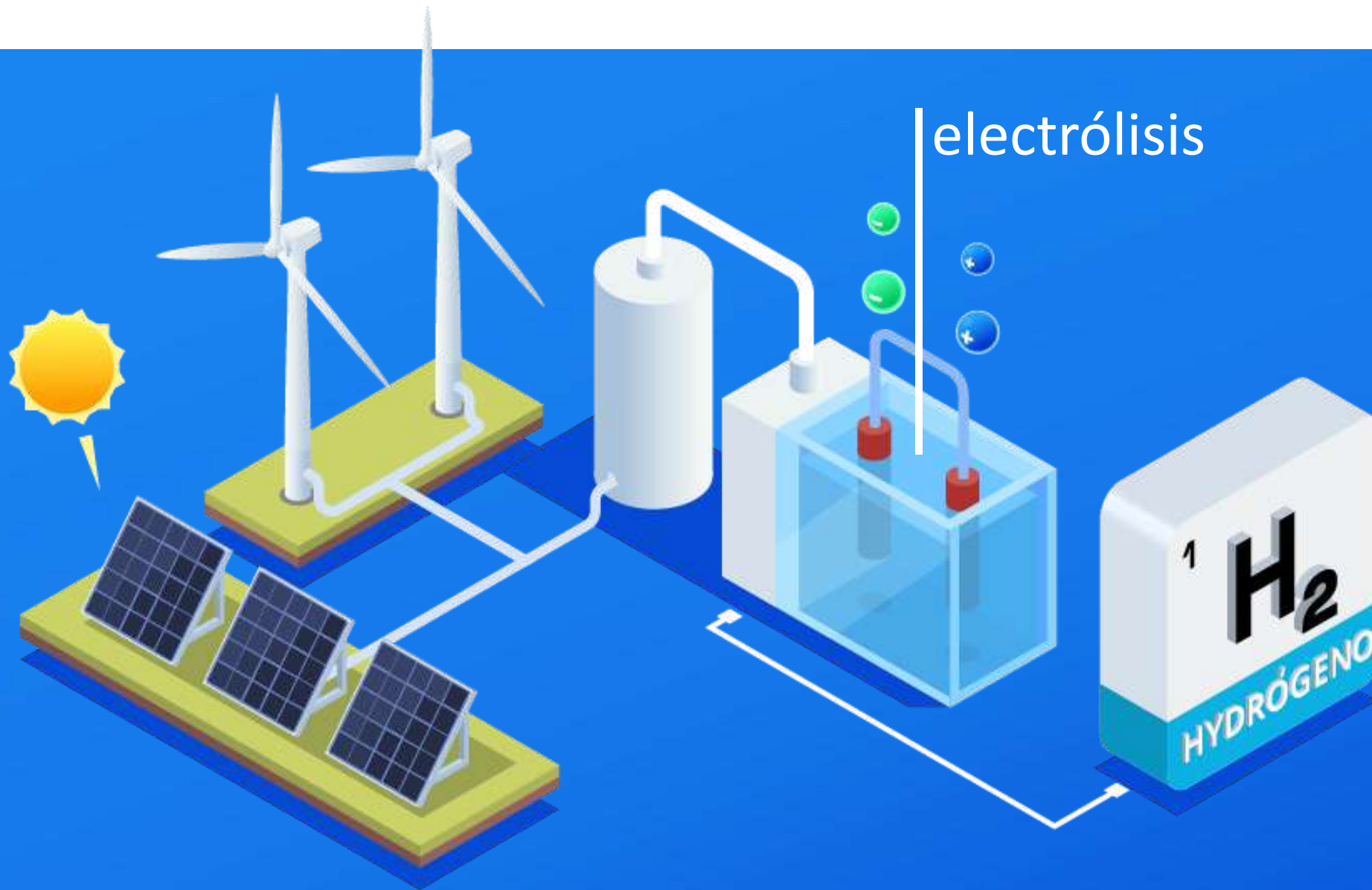
¿De donde obtenemos el hidrógeno?



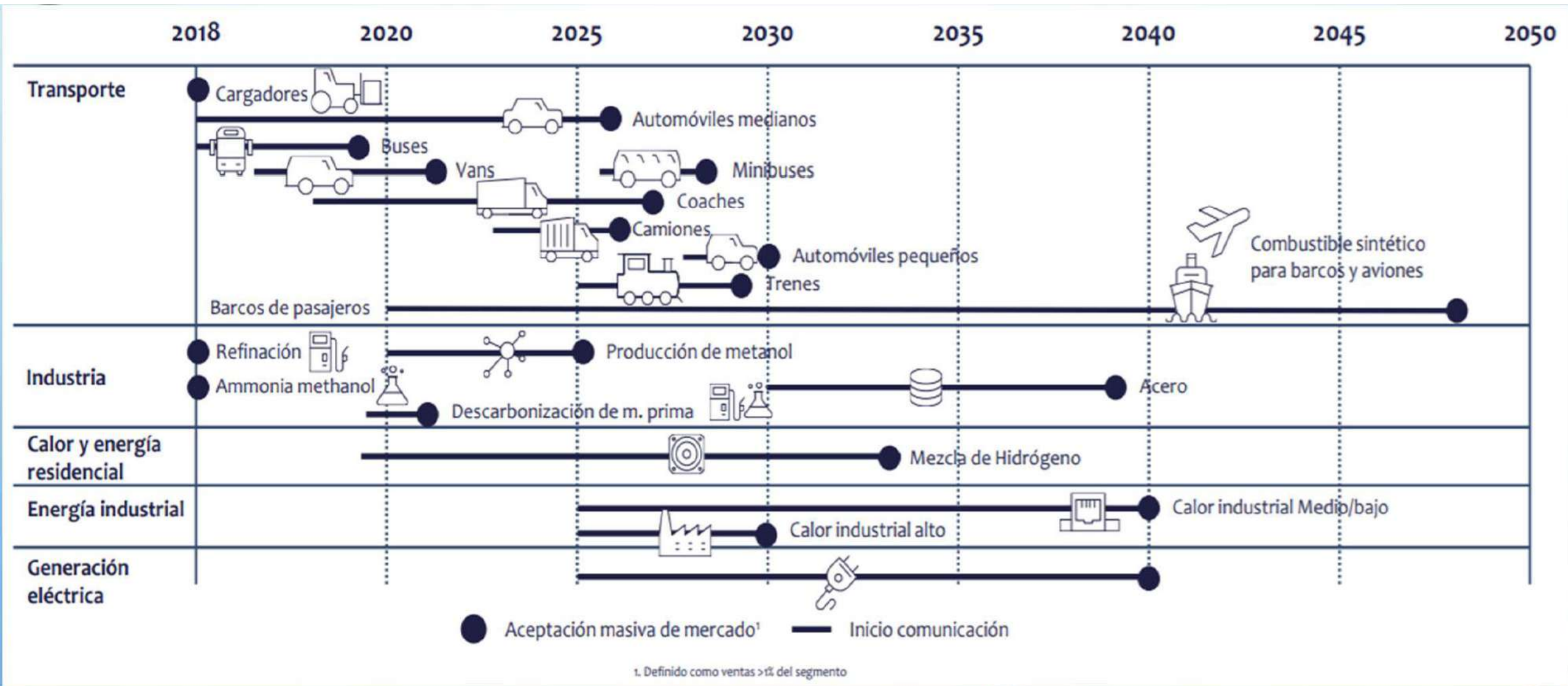
¿De donde obtenemos el hidrógeno?



¿De donde obtenemos el hidrógeno?



Descarbonización
Mitigación de Cambio
Climático



Fuente Original: McKinsey & Co – Extraído de PDF: Estrategia Nacional Hidrógeno Verde; Ministerio de Energía 23.junio.2020

https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/mini-sitio/estrategia-nacional_hidrogeno-verde_vdef.pdf

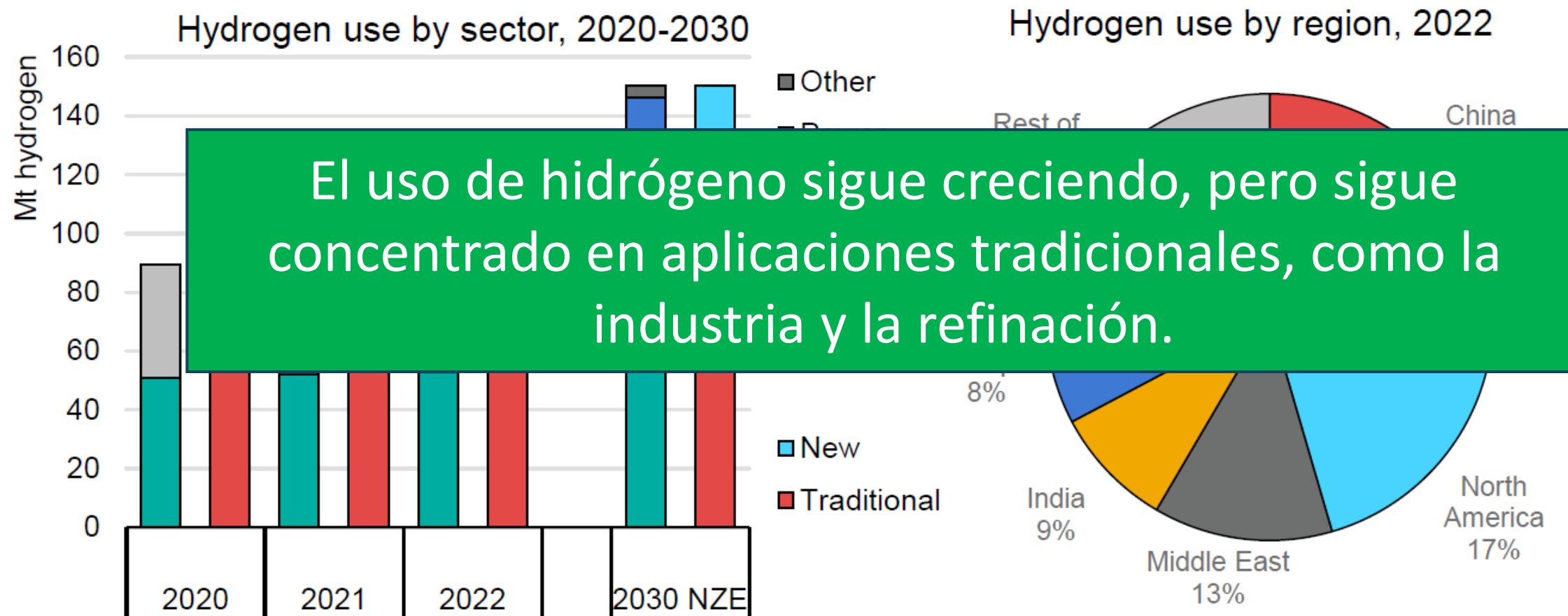
EVOLUCIÓN DE LA INDUSTRIA: POTENCIAL DE H2V



Source: IRENA (forthcoming-a). Map source: Natural Earth, 2021

*Potencial técnico para producir hidrógeno renovable por menos de **1,5 USD/kg** para 2050, en EJ.*

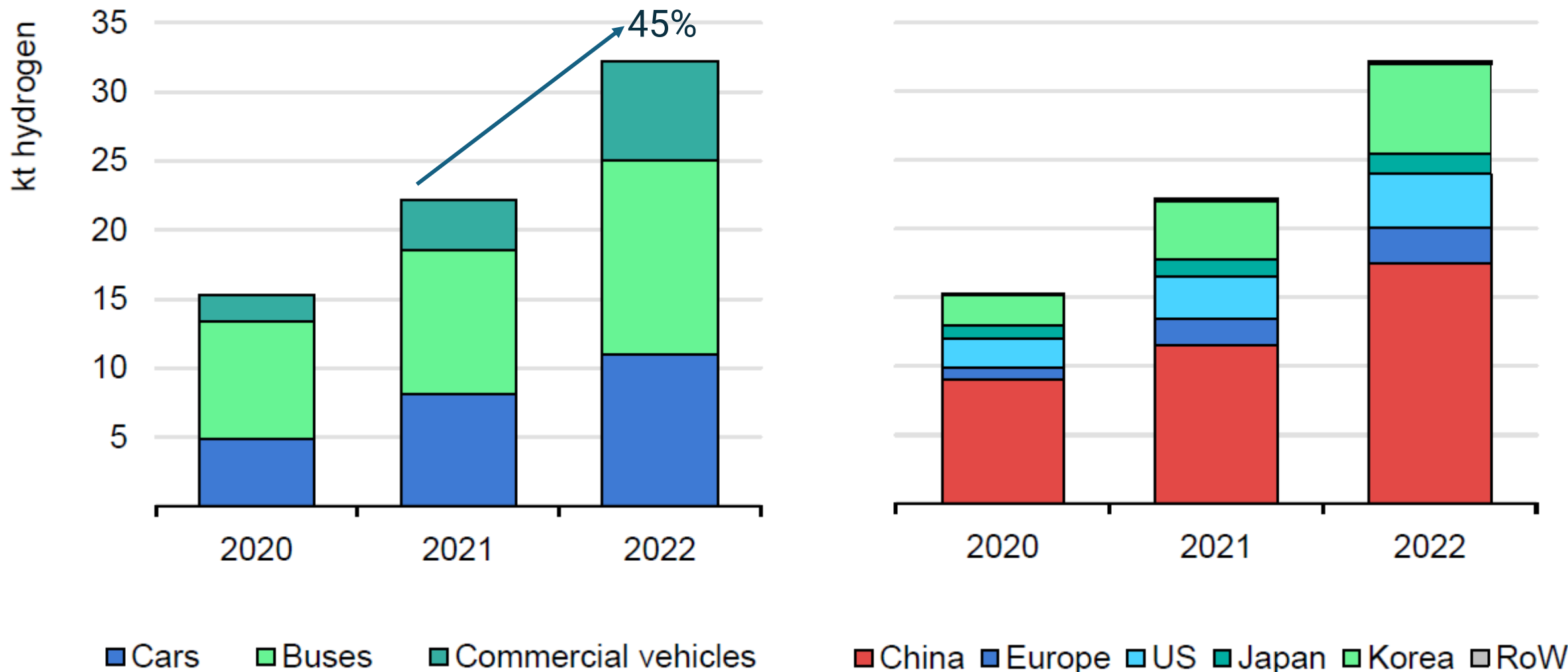
Uso de hidrógeno por sector y por región, histórico y en el Net Zero Escenario de emisiones para 2050, 2020-2030



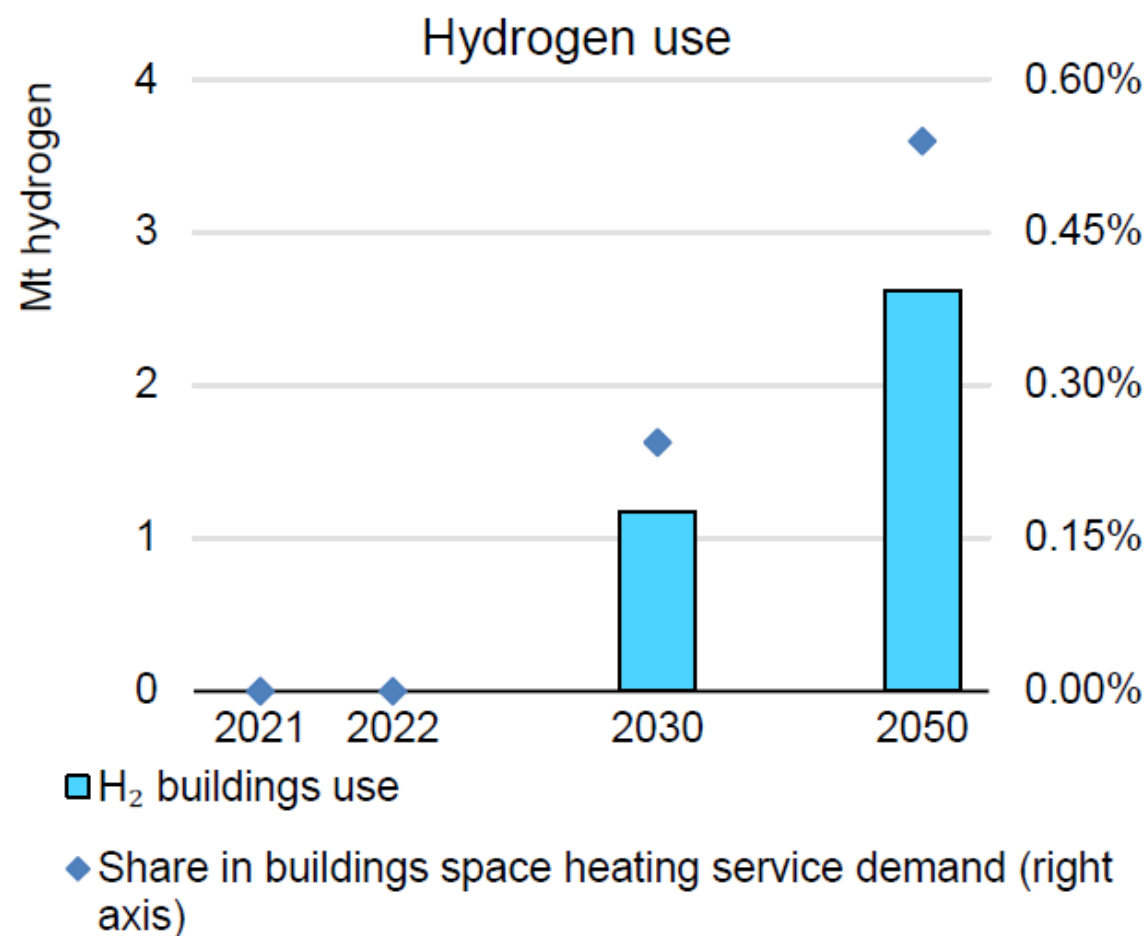
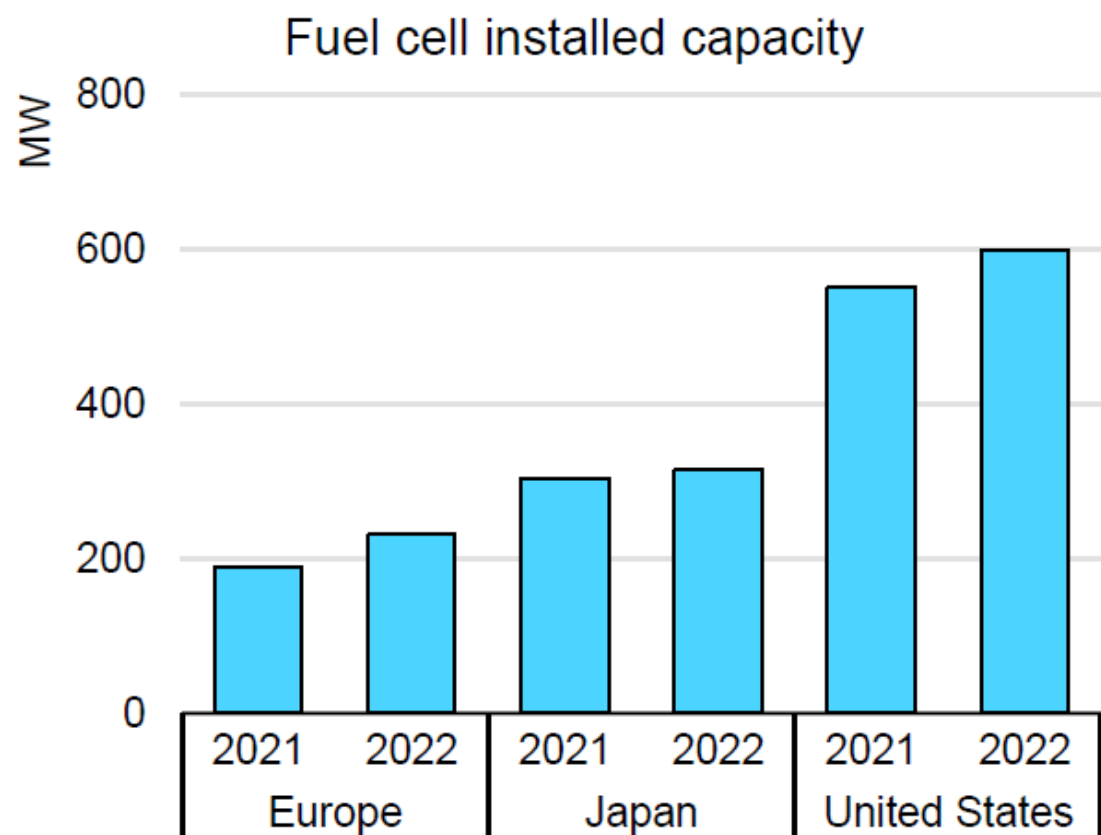
IEA. CC BY 4.0.

Notes: NZE = Net Zero Emissions by 2050 Scenario. "Other" includes buildings and biofuels upgrading.

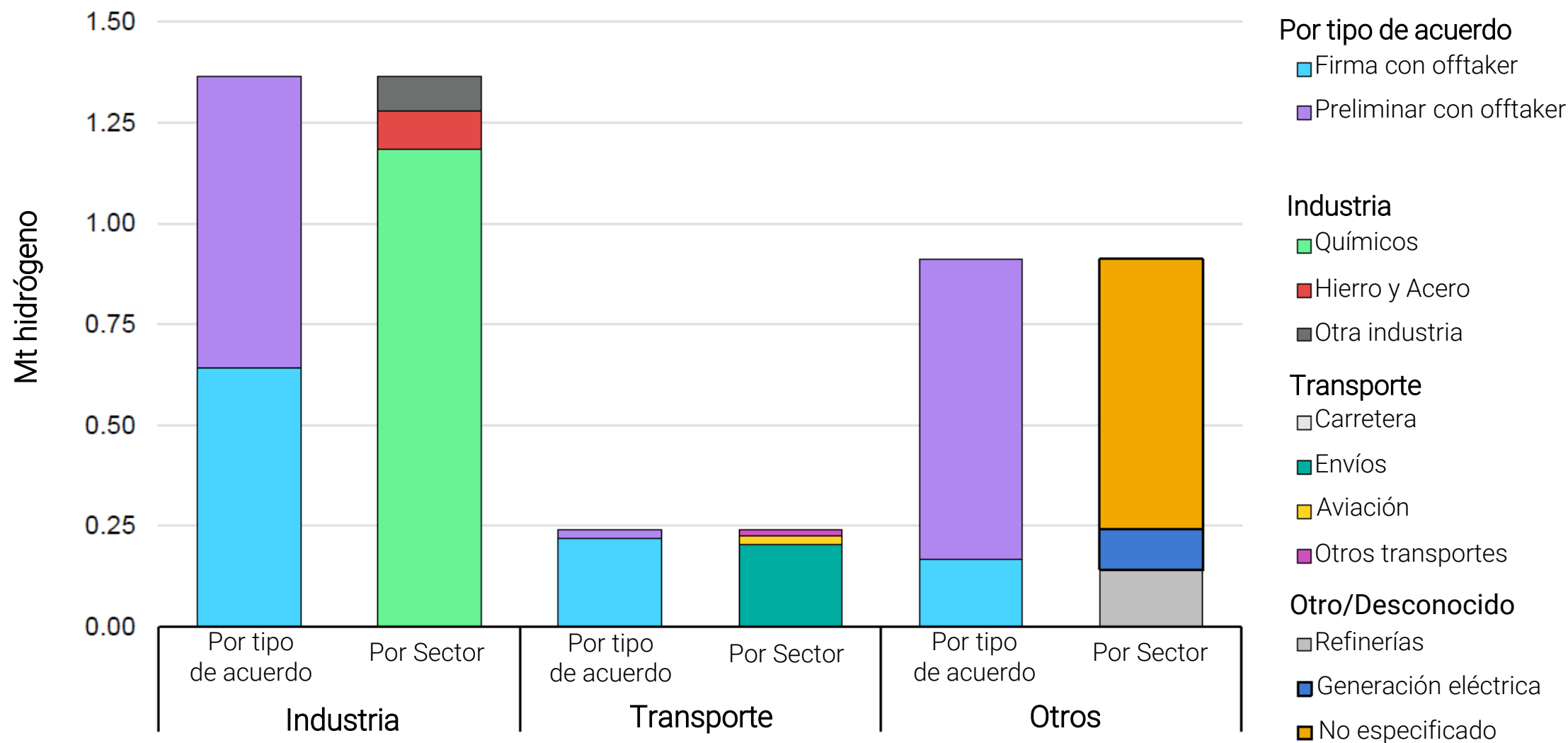
Consumo de hidrógeno en el transporte por carretera por segmento de vehículos y región, 2020-2022



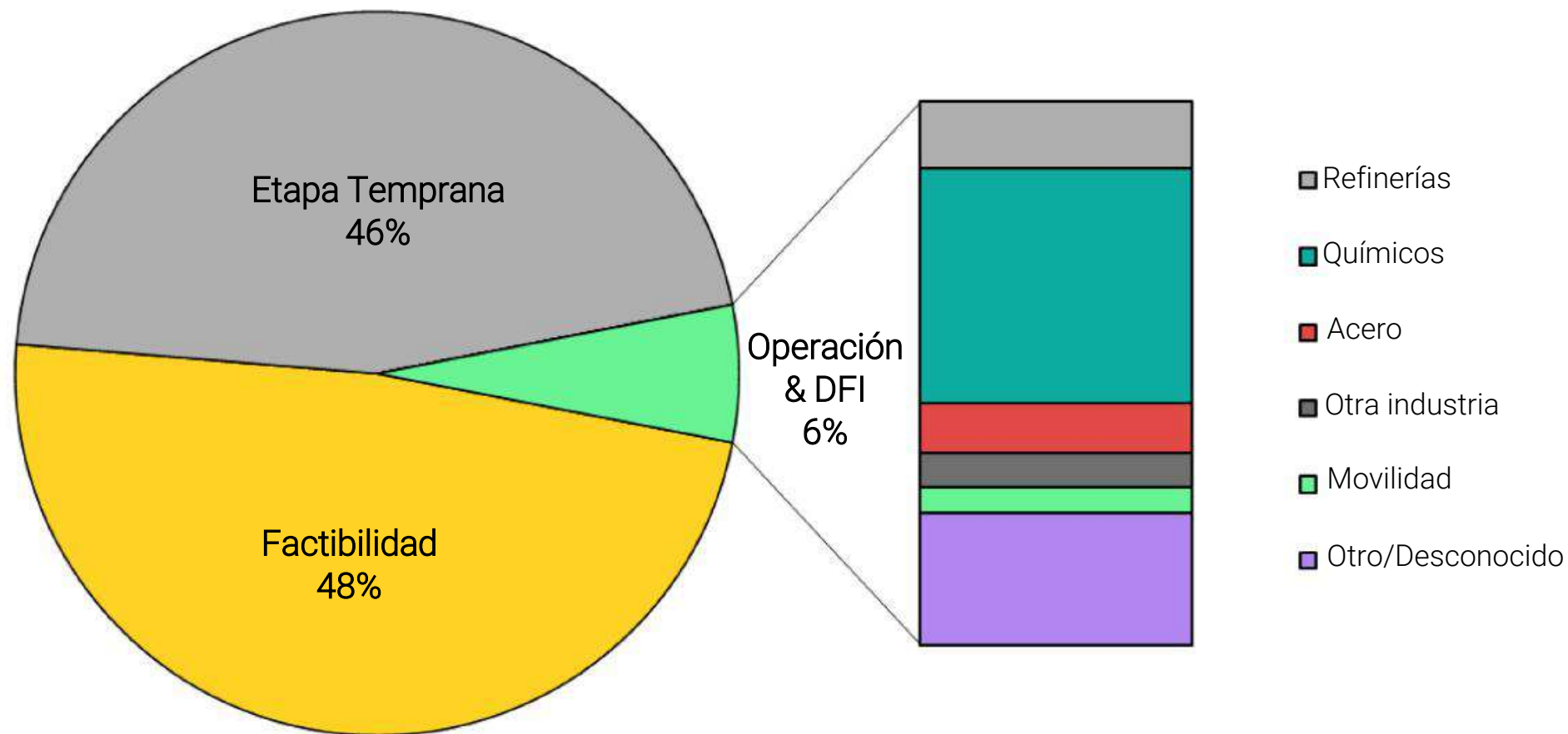
Existencias de Fuel Cells por región, 2021-2022, y uso de hidrógeno en EDIFICIOS en el escenario de emisiones netas cero para 2050, 2021-2050



Demanda potencial de hidrógeno de bajas emisiones que se puede lograr con acuerdos privados de compra anunciados para 2030



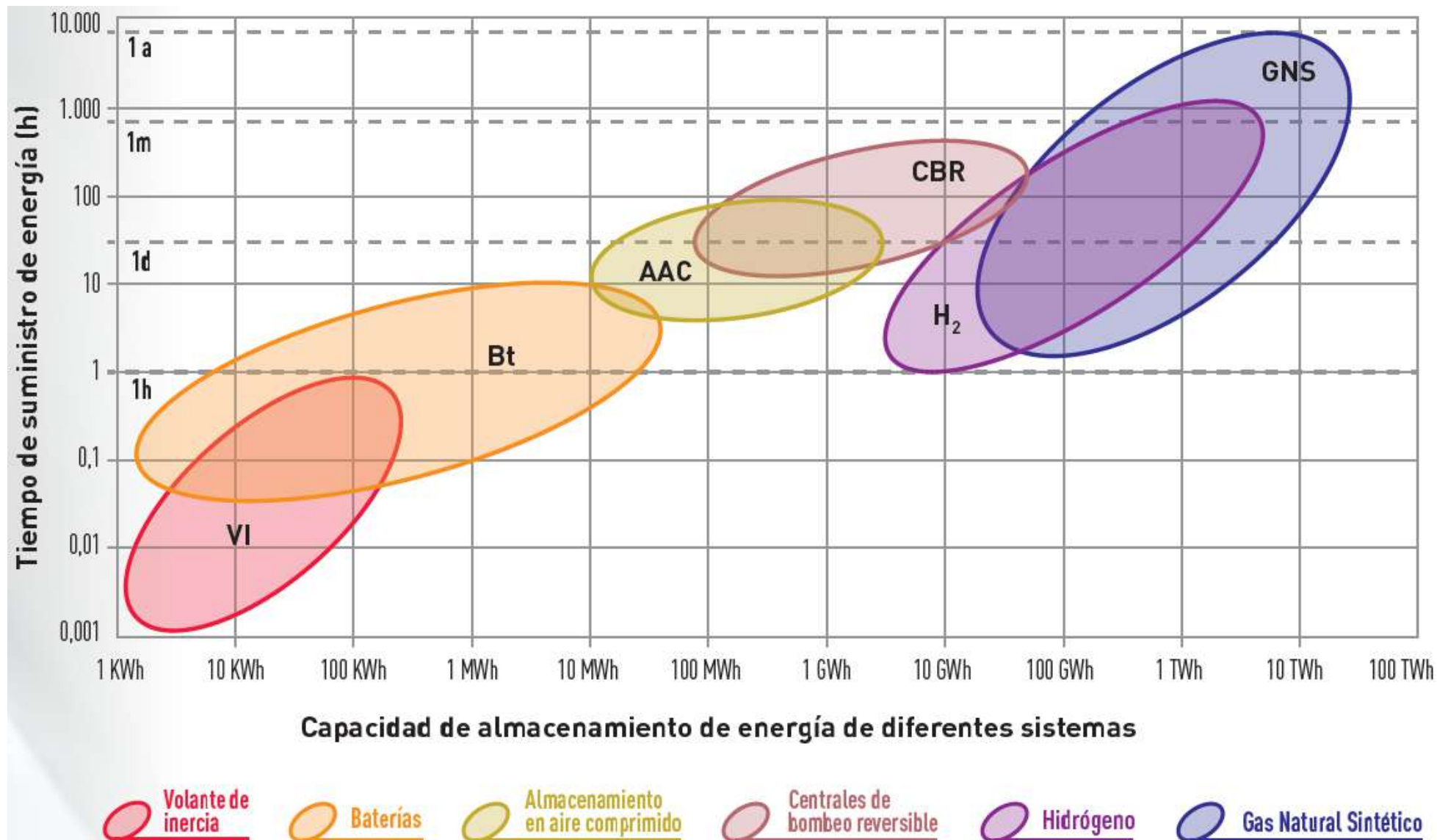
Producción de hidrógeno de bajas emisiones por estado y por sector en función de los proyectos anunciados, 2030



*DFI: Decisión Final de Inversión.

		Electrólisis Alcalina						Electrólisis PEM					
		2017 @ P atm			2025 @ 15 bar			2017 @ 30 bar			2025 @ 60 bar		
	Units	1 MW	5 MW	20 MW	1 MW	5 MW	20 MW	1 MW	5 MW	20 MW	1 MW	5 MW	20 MW
Potencia mínima	% Pnom	15%			10%			5%			0%		
Peak de potencia (para 10 min)	% Pnom	100%			100%			160%			200%		
Presión de salida	Bar	0 bar			15 bar			30 bar			60 bar		
Potencia consumida @ Pnom	kWhe/kg	58	52	51	55	50	49	63	61	58	54	53	52
Consumo de Agua	L/kg	15 L/kg											
Tiempo de vida promedio sistema	Años	20 años											
Tiempo de vida stack (carga completa)	hr	80,000 h			90,000 h			40,000 h			50,000 h		
Degradación del sistema	%/1000 h	0.13%/1,000 h			0.11%/1,000 h			0.25%/1,000 h			0.20%/1,000 h		
Disponibilidad	%/año	>98%											
CAPEX (Total equipos del sistema)	EUR/kW	1,200	830	750	900	600	480	1,500	1,300	1,200	1,000	900	700
OPEX (electrolizador)	% CAPEX	4%	3%	2%	4%	3%	2%	4%	3%	2%	4%	3%	2%
CAPEX (reemplazo stack)	EUR/kW	420	415	338	315	300	216	525	455	420	300	270	210

Parámetros económicos y técnicos de la tecnología de electrólisis disponible en el mercado. Fuente: Adaptado de Development of Business Cases for Fuel Cells and Hydrogen Applications for European Regions and Cities, pp.6, [27].



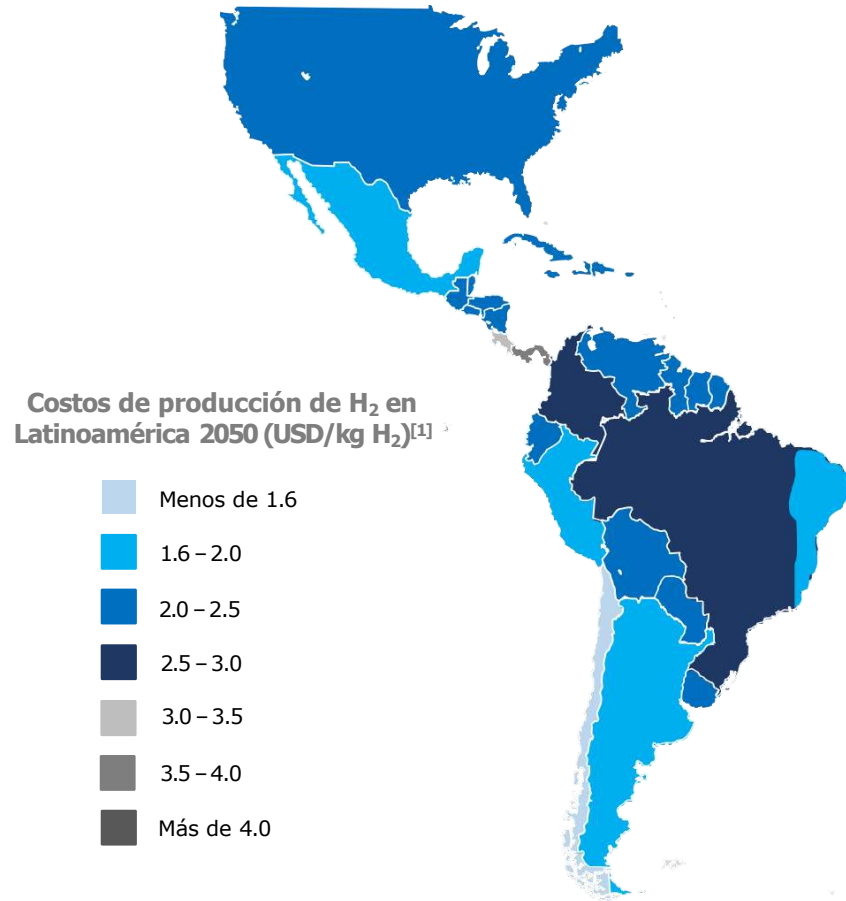
Capacidad de almacenamiento de energía de diferentes sistemas.



Panorama del hidrógeno verde en América Latina

¿Por qué hidrógeno en América Latina?

Motor para su desarrollo



Esfuerzos de descarbonización

- Sector transporte
- Minería y otras grandes industrias

Recursos renovables en abundancia

- La presencia de recursos hidroeléctricos, solares y eólicos abundantes y rentables permitirán la producción de H₂ verde a precios muy competitivos
- Exportación de hidrógeno: una visión a largo plazo

Diversificación para el sector hidrocarburos

- Grandes compañías públicas
- Establecimiento de capacidades técnicas, canales de distribución, y know-how para producir combustibles
- Infraestructura robusta existente

[1] – IEA analysis based on wind data from Rife et al. (2014), NCAR Global Climate Four-Dimensional Data Assimilation (CFDDA) and solar data from renewables.ninja (2019)

Un total de 35 proyectos piloto industriales de H₂ reportados en LATAM, la mayoría en desarrollo



*Se excluyen proyectos I+D

Principales empresas explorando el H₂ verde en América Latina



Regulación – Panorama 2021

C O S T A R I C A

Plan Nacional de Energía: Incluye al H₂ como un combustible limpio y describe algunos cambios normativos requeridos.

Comisión del H₂: Ministerios + Empresas públicas para promover I+D, producción y comercialización de H₂.

Plan de Movilidad Eléctrica: incluye al H₂ explícitamente

U R U G U A Y

Estrategia Nacional de H₂ verde: En sus primeras etapas de desarrollo. Esperada en segundo semestre 2024.

C H I L E

Estrategia Nacional de H₂ verde: Única publicada en la región hasta el momento.

Guía de apoyo para Solicitud de Autorización de Proyectos Especiales de Hidrógeno ante SEC: Primer avance regulatorio de la estrategia, facilita la consecución de permisos para la implementación de proyectos relacionados a H₂ mientras la regulación específica no haya sido publicada.

Hidrógeno como energético a nivel regulatorio.

C O L O M B I A

Estrategia Nacional de H₂: En construcción, y esperada en segundo semestre de 2024. H₂ verde y H₂ Azul.

Plan Energético Nacional 2050: Incluye objetivos de penetración de H₂ cero emisiones.

Ley de Movilidad Eléctrica: Incentivos incluyen explícitamente vehículos FC

B R A S I L

Plan Energético Nacional : Incluye al hidrógeno verde y varios de sus usos finales dentro de los segmentos a desarrollar.

Plan para ER: Promueve diversas estrategias de I+D para el hidrógeno.

P A R A G U A Y

Ruta de H₂ Verde: Plan que analiza diferentes posibles estrategias para la implementación de H₂ verde en el país. Se podría considerar una "pre-Estrategia de H₂ verde"

A R G E N T I N A

Ley de promoción de hidrógeno (2006): Nunca fue reglamentada.

Plan Nacional de Hidrógeno del 2014: Nunca se implementó debido a cambio de gobierno.



Costa Rica



Algunos pilotos de movilidad y estudios para el desarrollo de la economía del hidrógeno en el país



Ad Astra, Recope, Cummins, Toyota:

- 1 bus Cummins (2018) y 4 Toyota Mirai (2019) con H₂ verde (energía solar) operando.
- Vehículos utilizados en leasing para servicio de transporte VIP
- Fondos de Toyota Mobility Foundation para escalar piloto.
- Costa Rica fue el primer país de Latinoamérica al que llegó el modelo Mirai de Toyota.



Instituto Costarricense de Electricidad (ICE):

- Dos acuerdos de colaboración, firmados con Siemens y Ad Astra.
- Identificación de casos de negocio para el H₂.
 - Interés en reconversión de turbinas a gas
 - Parte del Plan Nacional de Descarbonización 2018-2050.



Alianza H₂ Costa Rica: impulsar y desarrollar el ecosistema de H₂ para la movilidad sostenible

- Varios actores están trabajando juntos para introducir el hidrógeno en Costa Rica
- CRUSA como ente administrador
- Fondos BID: Estudios técnico-financieros de movilidad H₂
- HINICIO viene desarrollando una hoja de ruta nacional.

Principales retos a nivel de proyectos

Optimización
rentabilidad y modelo
de negocio

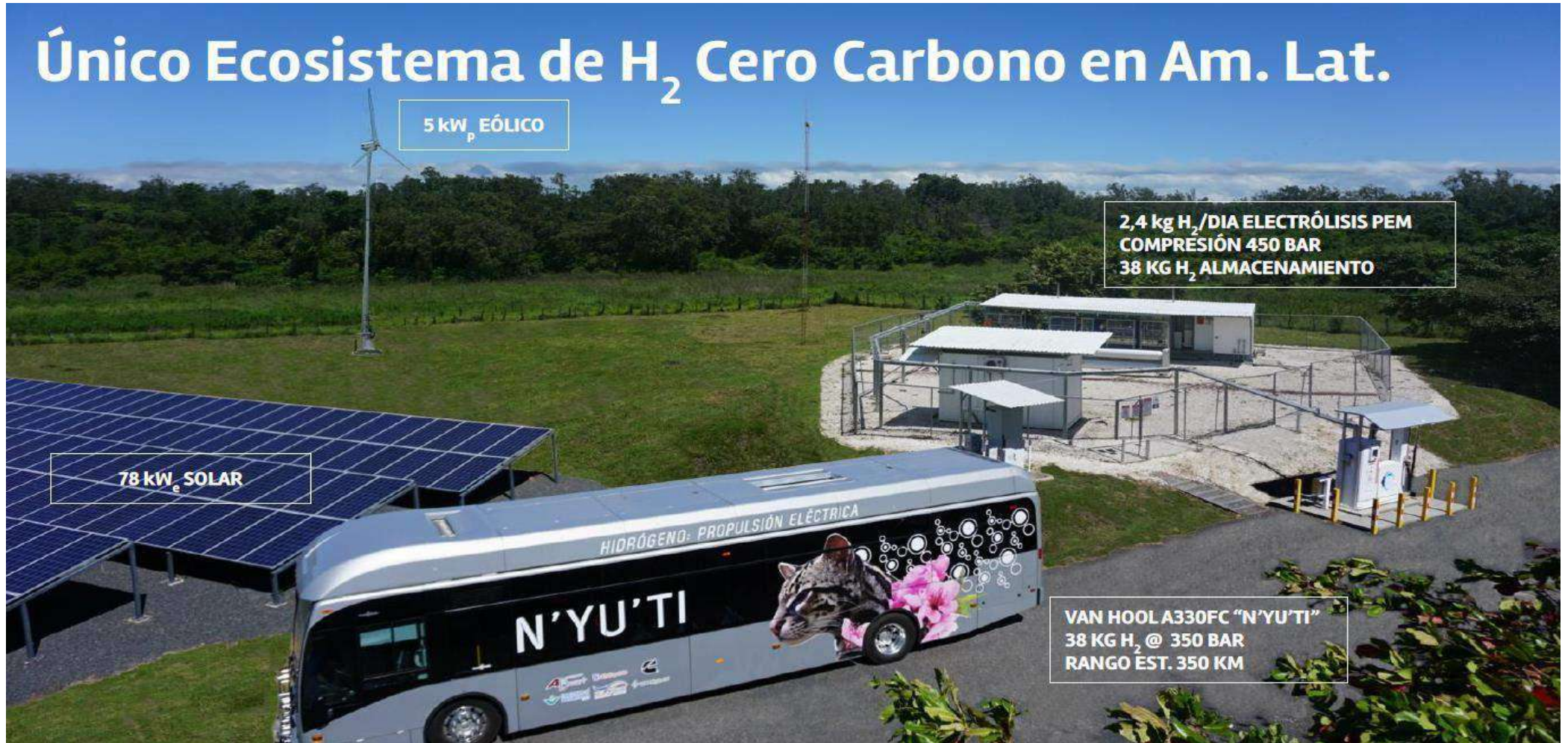
Menos diversidad de
usos finales

Falta
de regulación y
apoyo político

Poca
disponibilidad
de vehículos

Proyecto de Ad Astra

Proyecto de Movilidad FC en Costa Rica



Uruguay

La empresa nacional de petróleo y gas desarrolla un proyecto piloto de transporte con FCEV

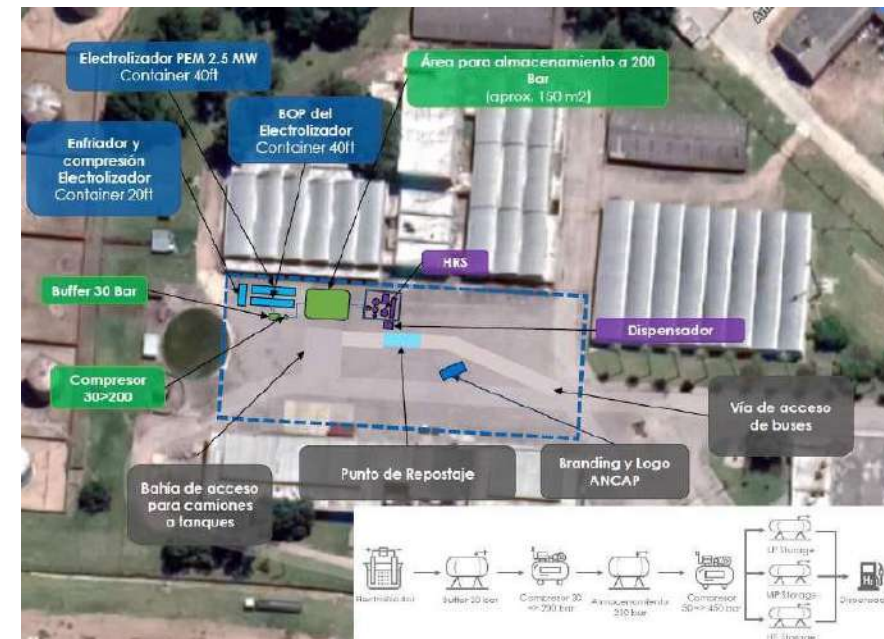
MIEM, UTE y ANCAP (2019): Piloto de buses interurbanos y camiones de carga.

- Inversiones estimadas ~ 15 millones USD
- Cooperación técnica del BID (250kUSD)
- Hoy en día llamado H2U



MEF y JBIC: Memorándum de Entendimiento para la cooperación en el desarrollo de proyectos verdes de H2

- Duración de 3 años
- Intercambio de información sobre tecnologías y proyectos existentes



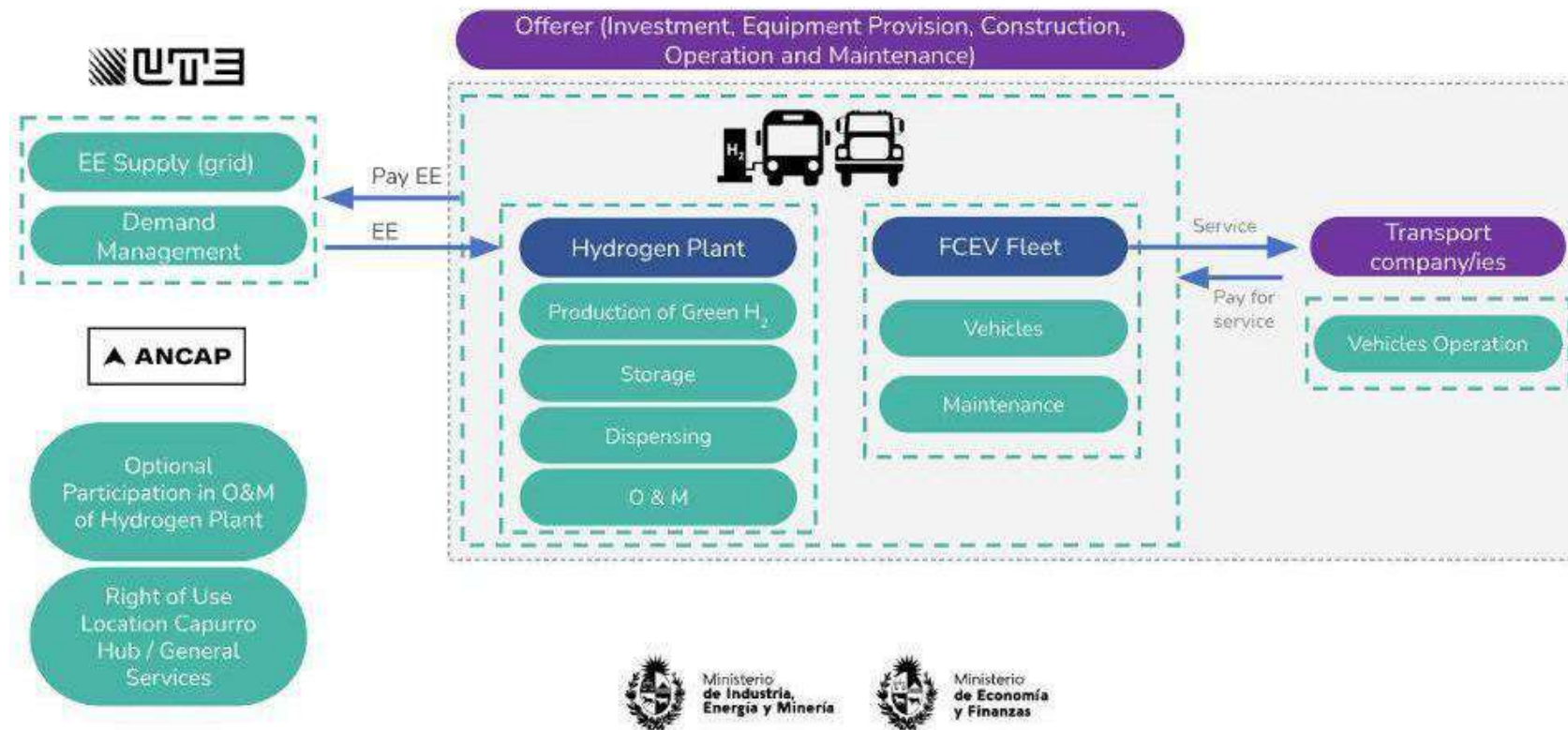
Principales retos a nivel de proyectos



Proyecto H2U (antes Verne)

Proyecto de Movilidad FC en Uruguay, con punto de recarga en Montevideo

Initial business model H₂U Pilot - Defined



Ministerio
de Industria,
Energía y Minería



Ministerio
de Economía
y Finanzas

Brasil



Comienzan los esfuerzos públicos y privados para el desarrollo temprano de H₂, pero falta impulso político



Ministerio de Ciencia, Tecnología, Innovación y Comunicaciones (2018):

Programa Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación para Energía Renovable y Biocombustibles.

- Metas para el desarrollo de la producción y consumo de hidrógeno verde



Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo (2015):

Piloto de 3 FCEB con participación de actores de importancia¹.

- Financiado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)
- Fondos de la Agencia Brasileña para la Innovación.



Hub de Hidrógeno de Pecem:

Proyecto en etapas iniciales de desarrollo con potencial de:

- 5 GW de electrólisis
- 900 kton H₂/año
- 5.4 mil millones USD

Principales retos a nivel de proyectos

Poco apetito político

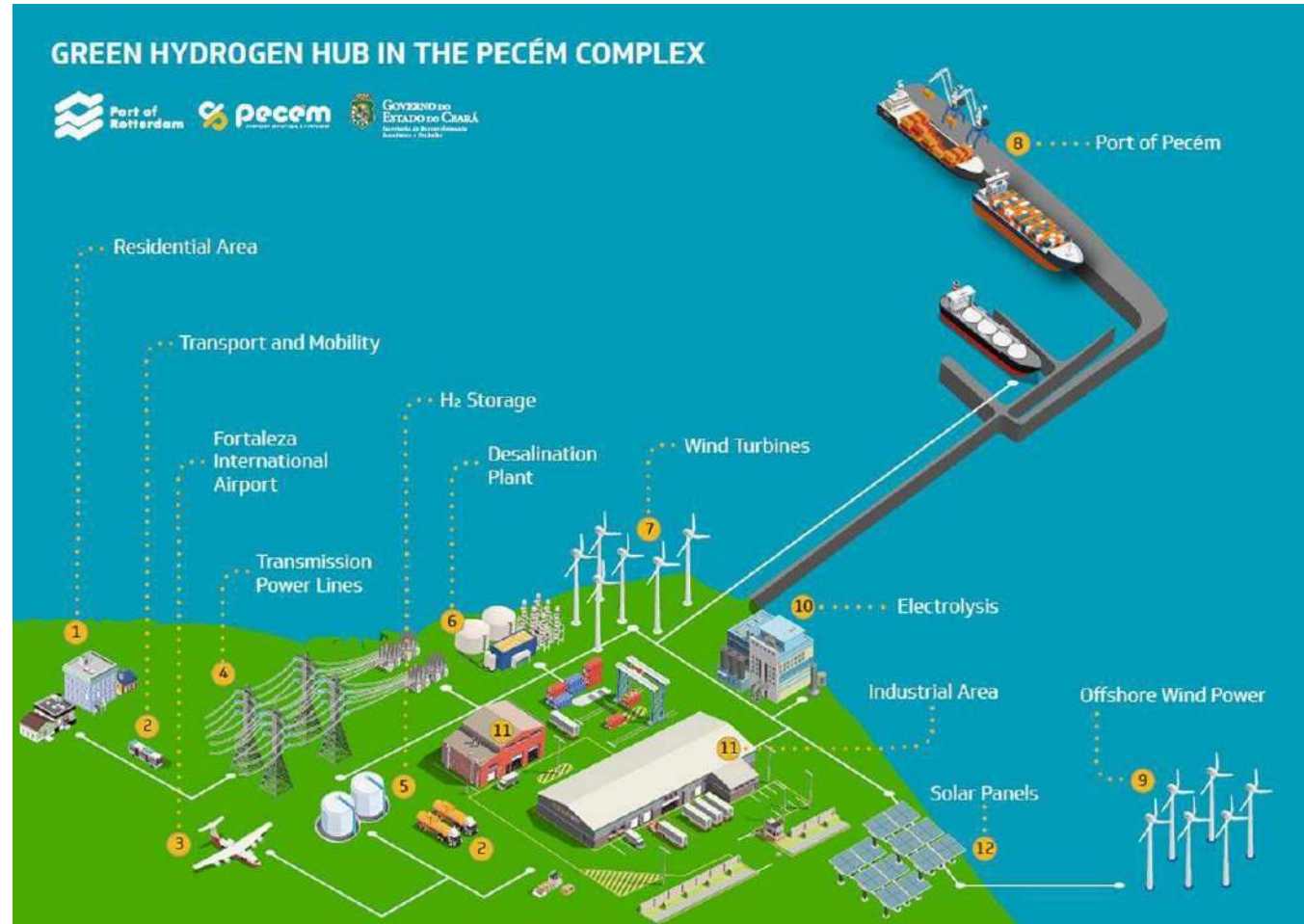
Esencialmente
pequeños pilotos y
proyectos de I+D

Poco liderazgo
industrial

Estrategia nacional
enfocada a bioetanol y
BEVs

Hub de Hidrógeno de Pecém

Posicionando como futuro hub de exportación de H₂ de Brasil a Europa



Argentina



El país cuenta con una planta piloto de producción de hidrógeno verde acoplada a una planta eólica desde 2008



HyChico: Planta piloto de H₂ a partir de electrólisis de eólica en Patagonia.

- Capacidad eólica de **6.3 MW**
- Factor de planta de 54,9% neto
- **Planta de electrólisis** inaugurada en el 2008 con capacidad total de **120 Nm³ H₂/h y 60 Nm³ O₂/h**
- **Actualmente se mezcla con gas natural para alimentar un genset**
- El objetivo a largo plazo: abastecer futuros mercados regionales e internacionales de **Hidrógeno Verde**



Hinicio esta analizando otros **proyectos para IPPs renovables** en la Patagonia desde la perspectiva de **LCOH y mercados locales**



Principales retos a nivel de proyectos

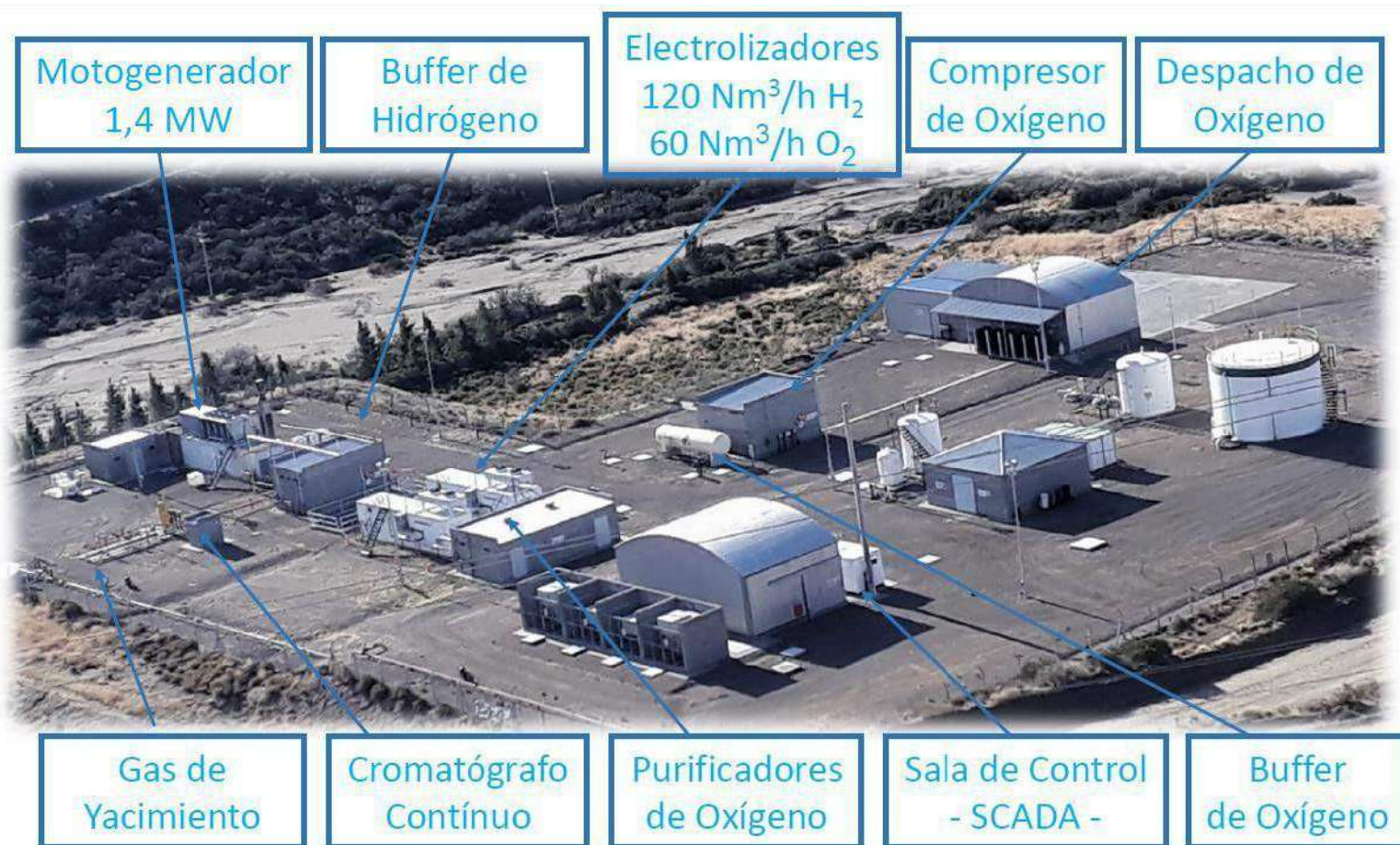
Situación país y
costo de capital

Optimización
rentabilidad y
modelo de negocio

Falta de un
ecosistema
local

Falta de mercado
local en Patagonia

HyChico



Guyana Francesa

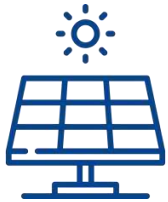


Funcionamiento la planta de energía solar con la mayor capacidad de almacenamiento de H₂ en el mundo



Planta Eléctrica de Guayana Francesa Occidental

Parque solar de 55 MW con sistema de almacenamiento de energía renovable basado en hidrógeno (**140 MWh**), combinado con baterías de almacenamiento adicionales



Planta Solar + Almacenamiento H₂: Contará con la capacidad de almacenamiento más grande del mundo de energía 100% limpia

- Desarrollador: Hydrogene de France
- Inversión presupuestada ~ 90 millones de euros
- Actualmente en fase de construcción
- 2022: entra en operación

Principales retos a nivel de proyectos

Optimización
Rentabilidad depende de
subsídios

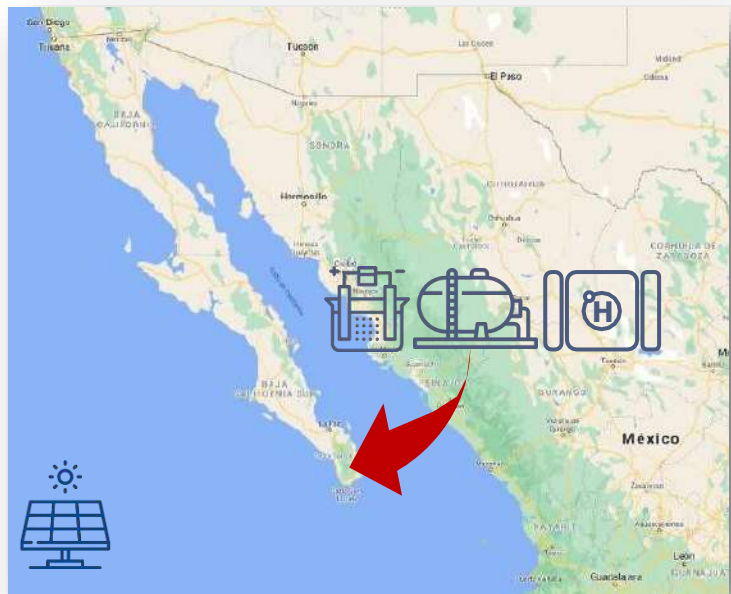
Optimización
modelo
de negocio

Optimización de la
cadena de valor

México



Alto potencial de producción de H₂ con entorno político y económico complejo



Mención en el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional
Diagnóstico nacional para GIZ México desarrollado por Hincio.

Bajo desarrollo de nuevos proyectos y baja certidumbre regulatoria
en energías renovables.

No hay planes estatales o nacional de desarrollo del H₂.



HDF-Energy - Energía Los Cabos: Planta PV acoplada a un sistema Power-to-Power con FC y almacenamiento de H₂ y en baterías para gestionar las fluctuaciones de energía.

- Producirá 22MW durante el día y 6MW durante la noche
- La producción de energía anual será de 115 GWh, equivalente al consumo energético de 60,000 personas
- 2025: entrada en operación programada.

Principales retos a nivel de proyectos



No existe todavía
ninguna política nacional
sobre H₂

Falta de
conocimiento técnico y
proveedores

Optimización de
modelos de negocio

Falta de incentivos y
regulación

Colombia



Existe un interés reciente pero creciente en el uso de H2 como vector energético por parte de empresas pujantes en el sector



Ricardo Sierra, **presidente de Celsia**, enfatizó sobre:

- Necesidad de incentivar a las energías limpias,
- Llamando a profundizar el desarrollo en Colombia de las energías eólica y solar, su acumulación con baterías y **el hidrógeno**¹



Promigas ha expresado su interés por evaluar la posible integración de **tecnologías P2G** para inyección de hidrógeno al sistema de transporte nacional de gas natural



Hinicio fue contratado por Ecopetrol, la principal empresa de Oil & Gas en Colombia, para evaluar:

- Oportunidades de **descarbonización de sus operaciones**
- **Casos de negocio** para integrar la producción de hidrógeno verde a la compañía

En la actualidad han anunciado su interés de ser carbono neutrales a 2050, y ven al hidrógeno como un pilar importante en este proceso.

Principales retos a nivel de proyectos

No existe todavía ninguna política nacional sobre H2

Falta de conocimiento técnico y proveedores

Optimización de modelos de negocio

Falta de regulación

Colombia:

El H₂ se proyecta a tener una participación del 11% en la matriz energética nacional en el escenario más ambicioso: “Disrupción”

Fuente: Plan Energético Nacional 2050, Colombia, UPME



Consumo H₂ a 2050

Aprox 1.7 MM ton H₂

Aprox 1.2 MM ton H₂

La capacidad instalada para el escenario de disrupción debe de ser de



20 GW FNCER



1.8 GW H₂



© Hincio 2021

39

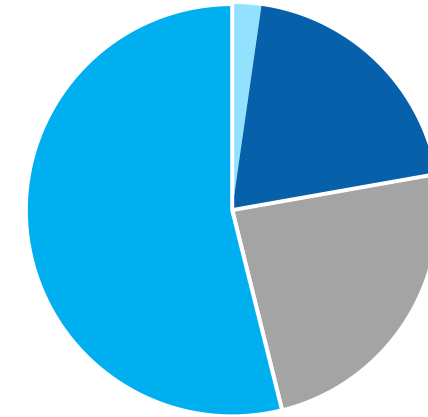
A mediano plazo (2030) del H₂, las principales demandas a nivel nacional podrían estar en transporte, gasoductos y refinerías.

Demanda H₂ 2030 Nuevos Sectores
Premisas:

	600.000 vehículos eléctricos, y de éstos, un 1% (6.000) a un 10% (60.000) son FCEV.
	1% - 5% de toda la mezcla transportada en gasoductos es H ₂ , el resto es gas natural.
	5% - 10% de la capacidad total consumida en refinerías podrá ser suplida por H ₂ verde, el resto por SMR
	1% - 5% de la capacidad instalada de almacenamiento eléctrico es electrólisis y almacenamiento de H ₂ , el resto en baterías.

Min ~ 32,000 Ton H₂/año en 2030
Max ~ 192,000 Ton H₂/año en 2030

Demanda estimada de H₂ Colombia
Escenario mínimo - 2030



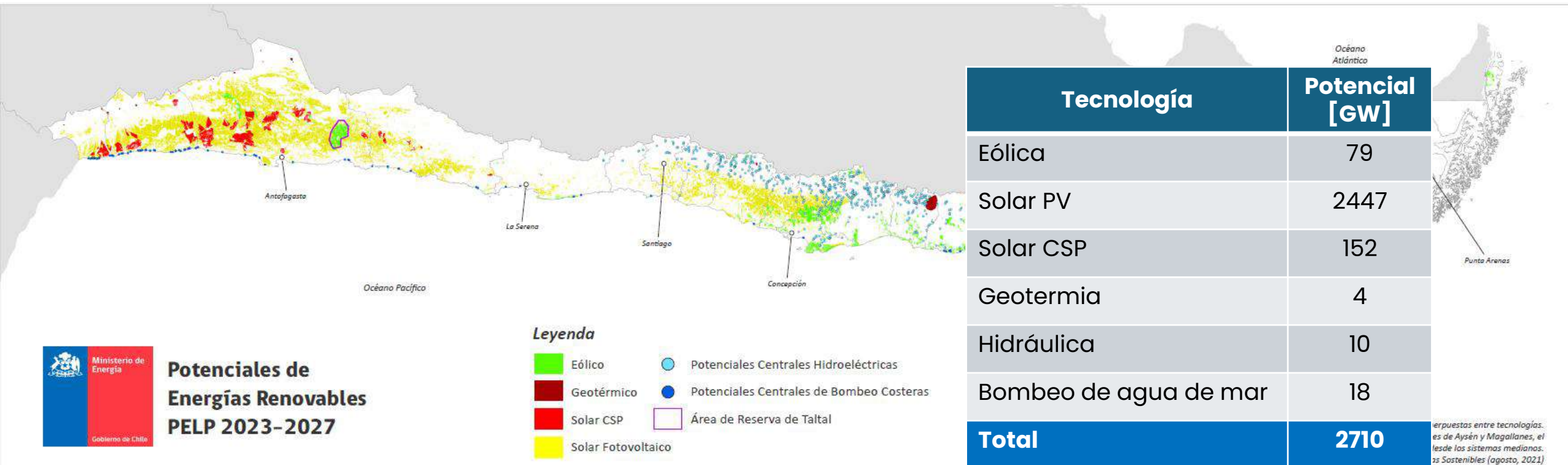
- Almacenamiento de Energía
- Refinerías
- Inyección en Gasoductos
- Movilidad terrestre



¿Y para cubrir esa demanda como estimamos
el potencial de H₂V?

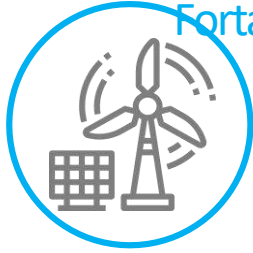
Potenciales Renovables

Consideraciones Territoriales: Los potenciales renovables consideran restricciones, *técnicas, territoriales y ambientales*. Algunos de los aspectos considerados se muestran a continuación, pero si necesitas mayor información puedes consultar el informe preliminar.



¿POR QUÉ EN CHILE?

Fortalezas que hacen de Chile uno de los más competitivos en la región



Inmenso potencial renovable

+1800 GW de capacidad potencial por instalar



Costos muy bajos de producción H₂ verde

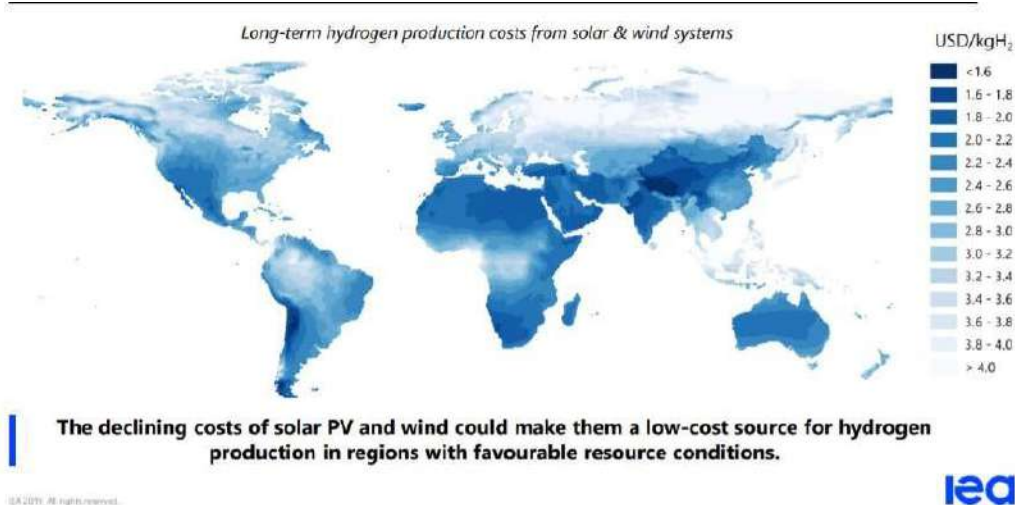
Altos factores de carga combinados con bajos costos de energía renovable



Fuerte apoyo del gobierno

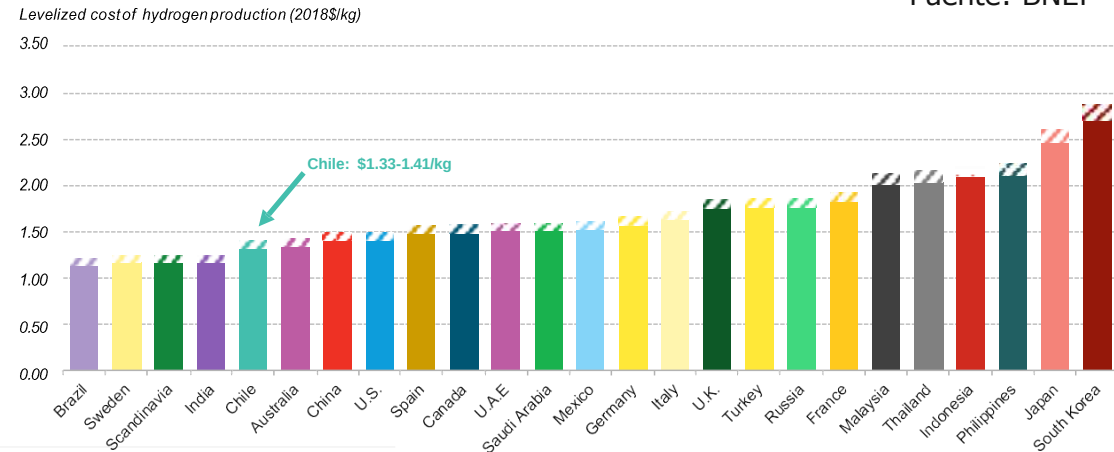
Metas ambientales del país para la descarbonización

Long-term H₂ production cost from solar & wind systems



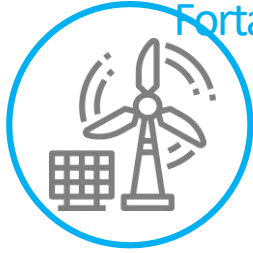
Forecast levelized cost of hydrogen production from renewables, 2030

Fuente: BNEF



¿POR QUÉ EN CHILE?

Fortalezas que hacen de Chile uno de los más competitivos en la región



Inmenso potencial renovable

+1800 GW de capacidad potencial por instalar



Costos muy bajos de producción H2 verde

Altos factores de carga combinados con bajos costos de energía renovable



Fuerte apoyo del gobierno

Metas ambientales del país para la descarbonización

1

Disminuir dependencia de combustibles fósiles
(BNE 2019, el 67% energía primaria fue petróleo crudo, carbón y GN)

2

Chile Carbono Neutral al 2050 (El 25% de emisiones GEI podrán ser mitigadas con H₂V al 2050)

3

NDC y metas sector transporte (Al 2050 se debiera tener un 70% del transporte de carga con H₂V)

4

Chile busca incrementar el uso de energías renovables:

- 70% al 2030
- 95% al 2050

POTENCIAL REAL DE GENERACION RENOVABLE, SEGÚN EL LAS ÁREAS DISPONIBLES EN ESTUDIO DE GIZ Y EL MINENERGIA

Tecnología	Potencial [GW]	FP [%]	Horas anuales	Generación [TWh]
Eólica	79	70	8760 (Magallanes)	485
Solar PV	2447	30	2700	1982
Solar CSP	152	40	5000	304
Geotermia	4	70	8760	25
Hidráulica	10	60	8760	53
Bombeo de agua de mar	18	30	2700	15
			Total	2864

Teniendo en cuenta que:

Energía química del H₂ (LHV ≈ 33,3 kWh/kg)

Eficiencia electrolizador H₂ ≈ 65%

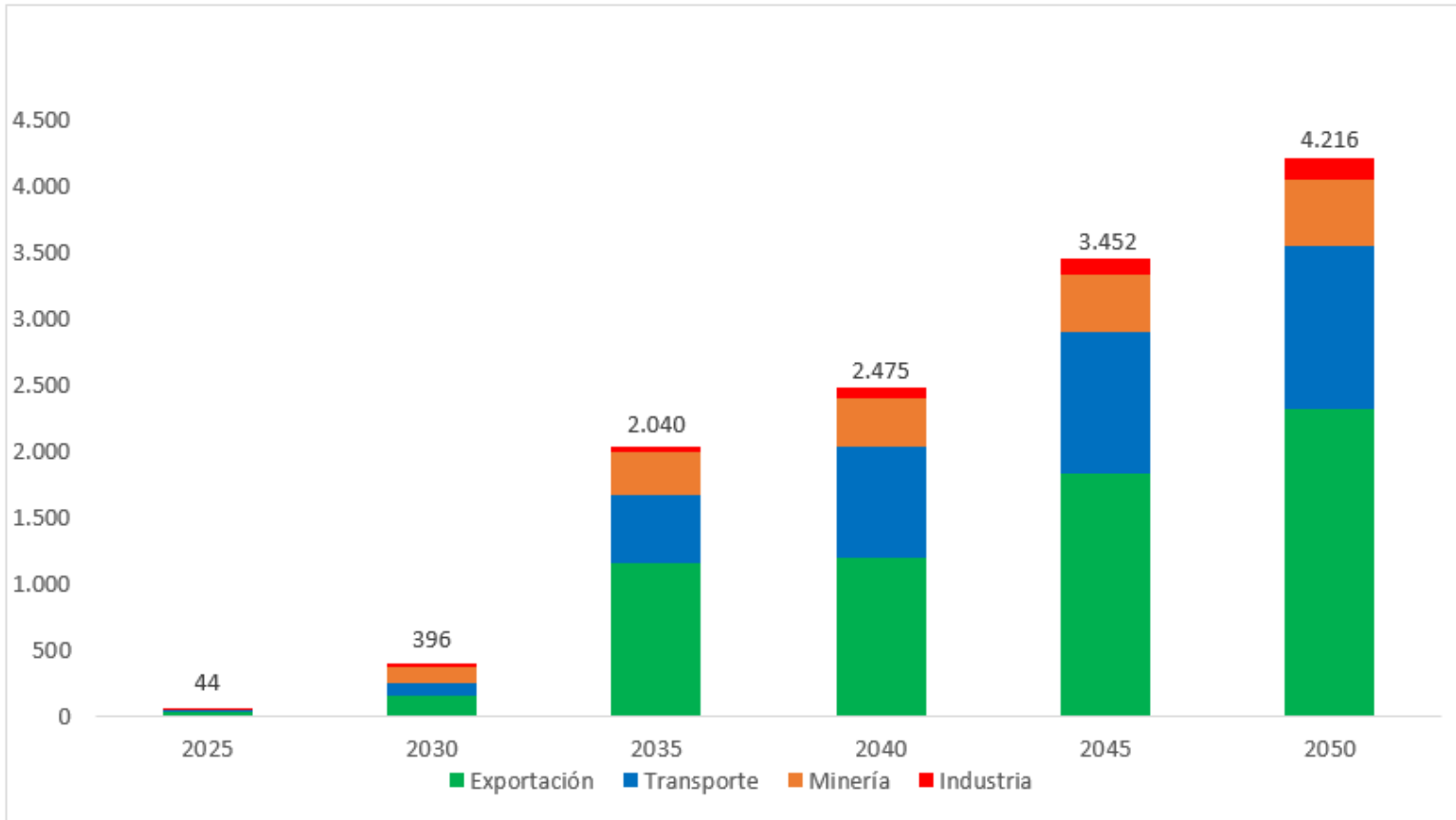
$$\eta_{ELZ} = \frac{\text{Energía del H}_2 [\text{kWh}]}{\text{Energía eléctrica consumida} [\text{kWh}]} = \frac{m_{H_2} \cdot LHV}{E_{elec}}$$

$$m_{H_2} = \frac{\eta_{ELZ} \cdot E_{elec}}{LHV} = \frac{0.65 \cdot 2,864 \times 10^{12} \text{ kWh}}{33.3 \text{ kWh/kg}} = 55.9 \times 10^9 \text{ kg anuales}$$

Demanda de H2 prevista al 2050 es de 4216 kTon:

El potencial de Chile es 55,900 kTon es
aproximadamente **13,3 veces mayor**

Perspectivas de demanda en Chile



Proyección de la demanda de H2V (kTon H2), según destino, en escenario consistente con la carbono neutralidad 2050. Fuente: Banco Central de Chile



73 PROYECTOS EN DESARROLLO Septiembre 2024



Última actualización: Septiembre 2024
 *Datos obtenidos de información anunciada públicamente

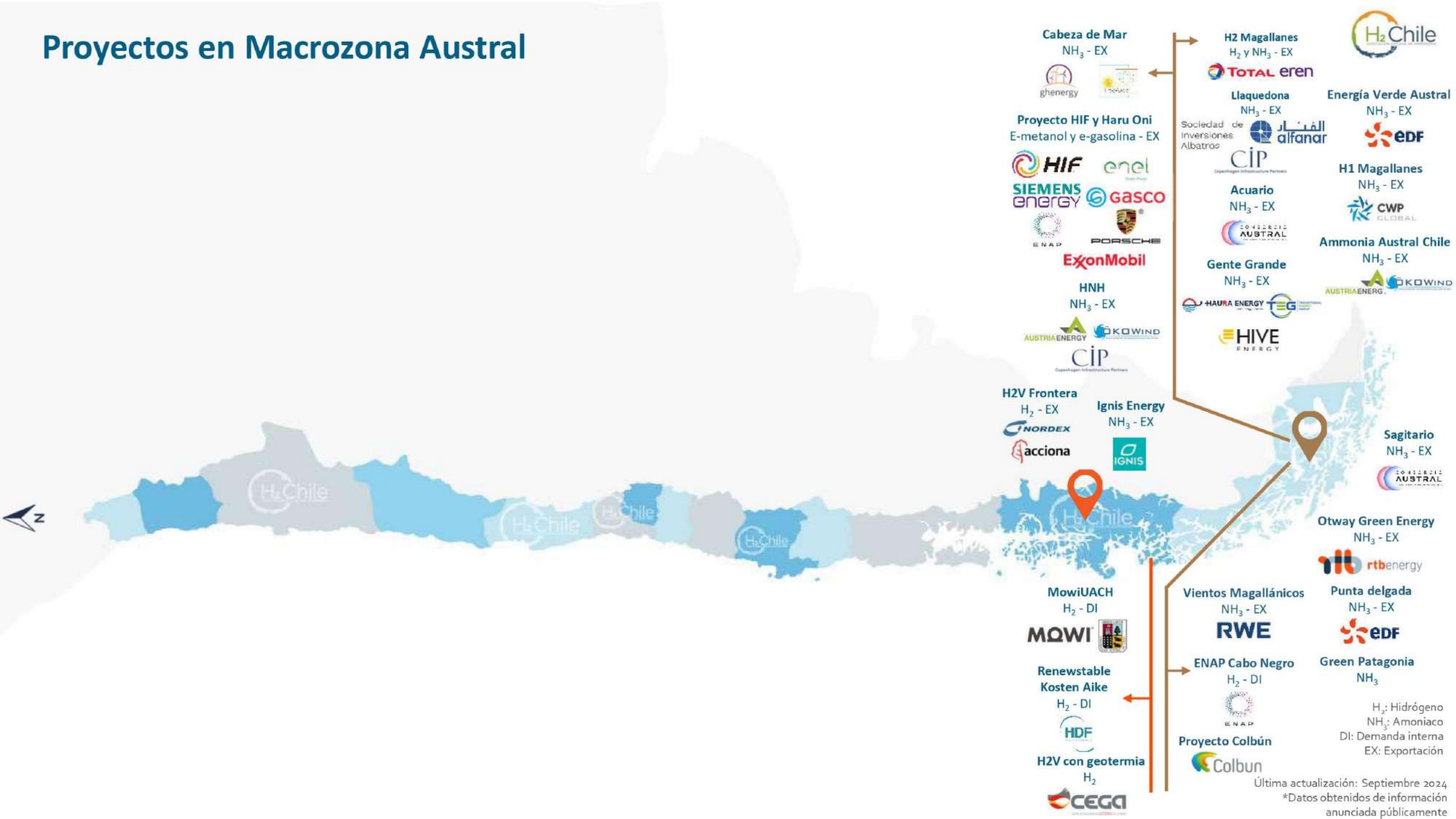
Proyectos en Macrozona Norte



Proyectos en Macrozona Centro-Sur



Proyectos en Macrozona Austral



Economía del H₂ verde y conceptos

Importante Considerar:

Dependiendo del uso de H₂ es posible encontrar distintas unidades de medida para representar su costo.

Energía

\$/MWh



\$/MJ
\$/MMBTU



\$/L
\$/m³



Materia Prima \$/Kg



Costo de producción del Hidrógeno



Para tener una métrica estandarizada de precio del hidrógeno verde, se utiliza el LCOH (Levelized Cost of Hydrogen) o “Costo Nivelado del Hidrógeno” y corresponde al cuociente entre los costos de producción de hidrógeno (**OPEX y CAPEX**)* y la masa producida de H₂ para el periodo de tiempo del proyecto. Su unidad de medida es [\$/kg de H₂].

***OPEX:** gastos operacionales como mantenimiento e insumos (electricidad, agua)

CAPEX: gastos de inversión de capital (como electrolizador e infraestructura)

Electrólisis del Agua

Hidrógeno Verde

Energía Renovable

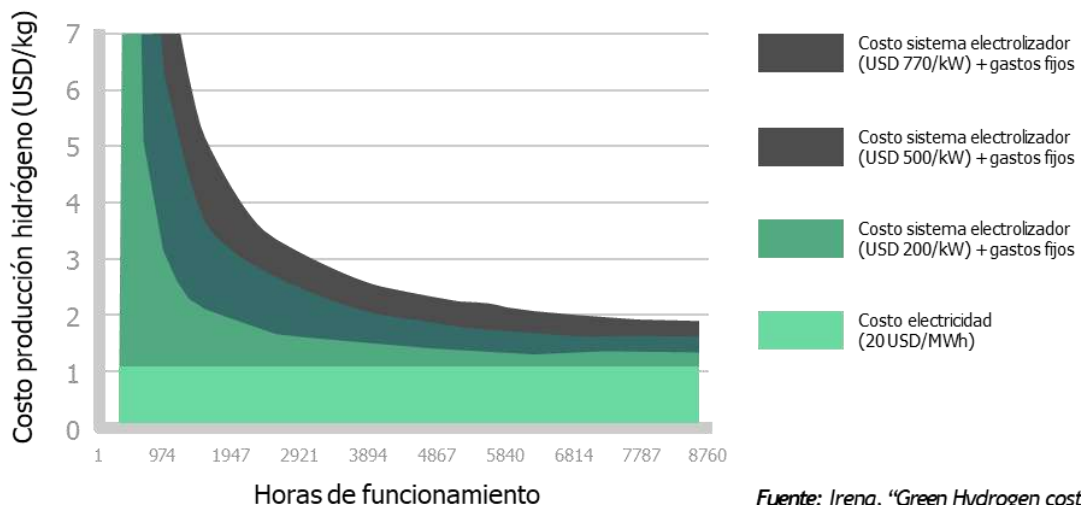
Agua



Hidrógeno

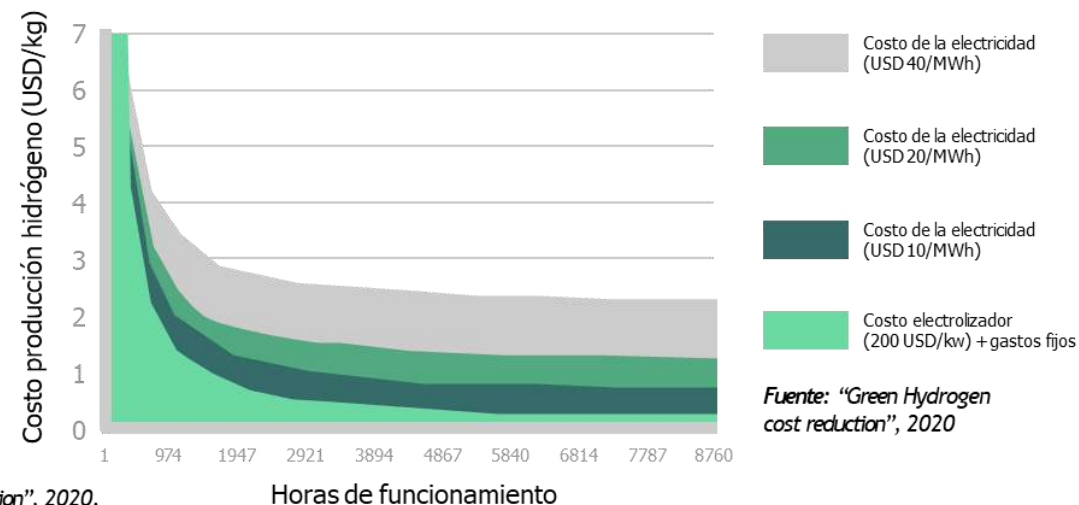
O₂

Impacto del CAPEX de la Planta (sistema de producción)



Fuente: Irena, "Green Hydrogen cost reduction", 2020.

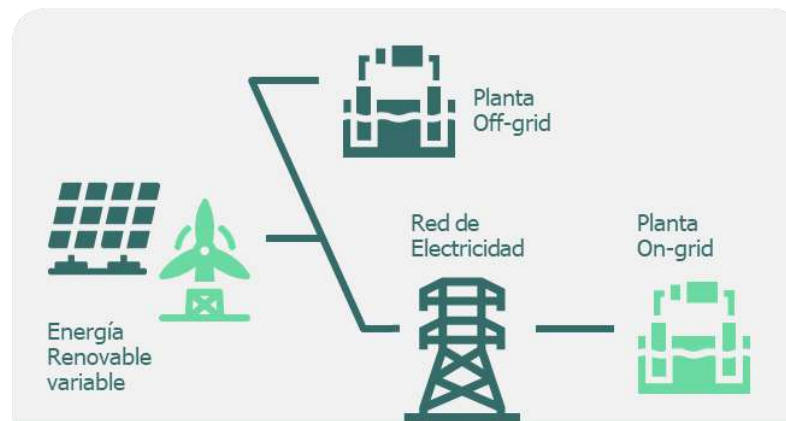
Impacto del Precio de la Electricidad



Fuente: "Green Hydrogen cost reduction", 2020

CONSIDERACIONES CÁLCULO COSTO

- **LCOE:** Constante.
- **CAPEX específico:** Varía en función de la potencia eléctrica y la madurez de la tecnología.
- **Producción variable:** Condicionada por la disponibilidad del recurso renovable.



CONSIDERACIONES CÁLCULO COSTO

- **LCOE:** Variable (10-40 USD/MWh)
- **CAPEX específico:** Constante.
- **Producción variable:** Condicionada por la disponibilidad del recurso renovable

Tanto el costo de la maquinaria como el precio de la electricidad impactará directamente a la competitividad del hidrógeno frente a otros energéticos de bajas emisiones de carbono.

Economía del H₂ verde y conceptos

$$\text{LCOH} = \frac{\text{CAPEX} \times \text{CRF} + \text{OPEX anual} + \text{Costo de energía}}{\text{kg H}_2 \text{ producidos/año}}$$

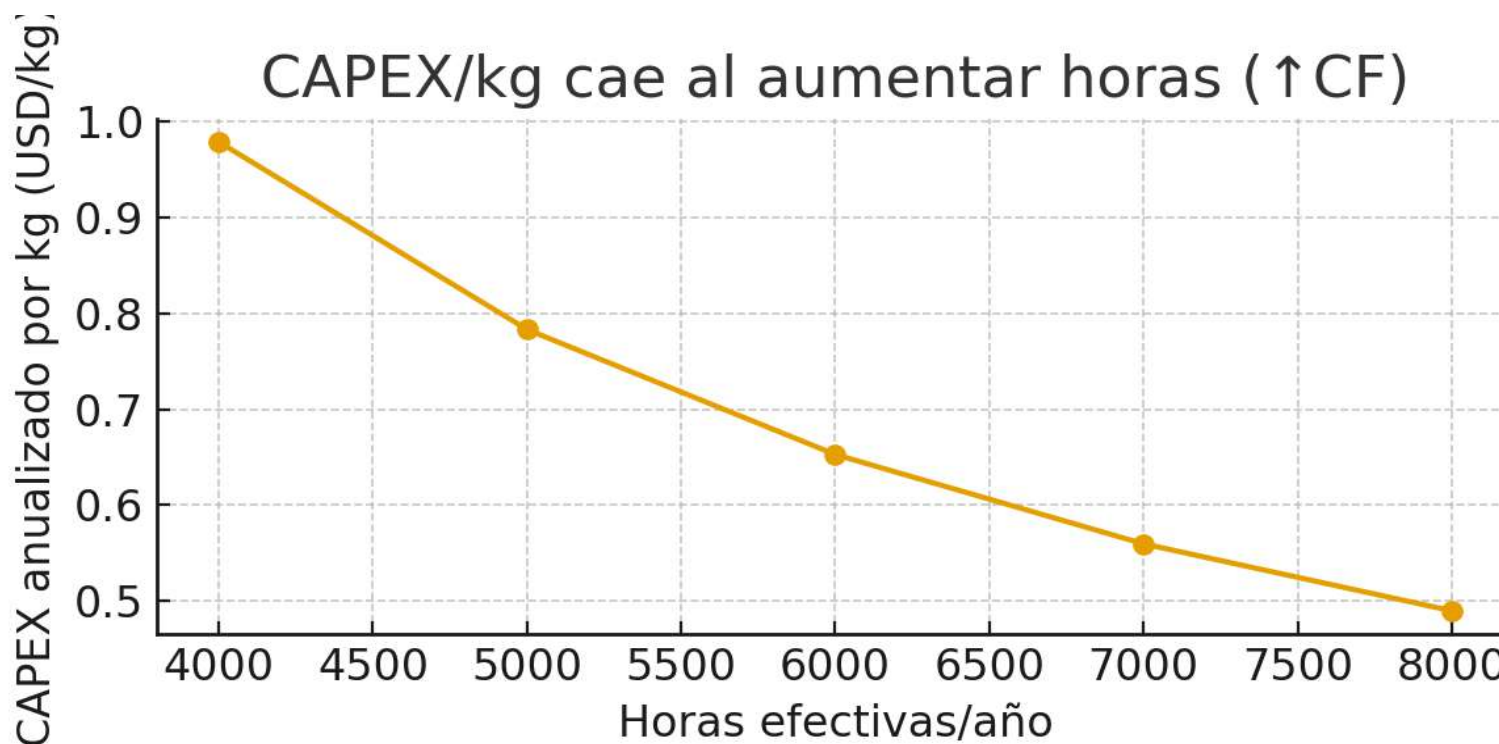
- **CAPEX×CRF:** CAPEX anualizado (CRF depende de WACC y vida útil).
- **OPEX:** mantenimiento, químicos, compresión, agua.
- **Energía:** kWh/kg × precio eléctrico.
Nota : “LCOH no incluye logística a cliente (se agrega después).”
- **CRF (Capital Recovery Factor)**

Componentes del LCOH (base-case)



Economía del H₂ verde y conceptos

Factor de planta — utilización del electrolizador



↑ CF (h/año) ⇒ se diluye CAPEX y OPEX por kg.

Importante: hibridación solar+eólica, almacenamiento, curtailment útil.

Economía del H₂ verde y conceptos

Caso ejemplo (100 MW PEM, 20 años, WACC 8%)

Supuestos:

- Precio energía: **30 USD/MWh**
- Consumo: **48 kWh/kg**
- CF: **70%** (6.132 h/año)
- CAPEX: **800 USD/kW**; CRF (8%, 20y) $\approx$ **0,102**
- OPEX: **4% CAPEX/año**
- Agua: **1 USD/m³**

- ✓ La **CRF (Capital Recovery Factor)** es el factor que convierte un **CAPEX inicial** en un **pago anual equivalente** durante n años con una tasa de descuento iii (WACC). Sirve para “anualizar” la inversión y calcular el término **CAPEX×CRF** dentro del LCOH.

Cálculo rápido:

- **Energía/kg** = $48 \text{ kWh} \times 0,03 \text{ USD/kWh} = \mathbf{1,44 \text{ USD/kg}}$
- **kg por kW·año** = $6.132 / 48 = \mathbf{127,75 \text{ kg}}$
- **CAPEX/kg** = $(800 \times 0,102) / 127,75 \approx \mathbf{0,64 \text{ USD/kg}}$
- **OPEX/kg** = $(0,04 \times 800) / 127,75 \approx \mathbf{0,25 \text{ USD/kg}}$
- **Agua/kg** $\approx \mathbf{0,01 \text{ USD/kg}}$
- **LCOH ilustrativo** $\approx 1,44 + 0,64 + 0,25 + 0,01 = \mathbf{\sim 2,34 \text{ USD/kg}}$

Economía del H₂ verde y conceptos

Fórmula básica

$$\text{CRF}(i, n) = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

Entonces el **costo anual equivalente** es $A = P \cdot \text{CRF}(i, n)$.

- i : tasa de descuento/WACC en términos anuales (p.ej. 0,08 para 8%).
- n : vida económica en años (p.ej. 20).
- Si $i \rightarrow 0$, $\text{CRF} \rightarrow \frac{1}{n}$ (pago uniforme sin costo de capital).

Ejemplo numérico (típico en H₂V)

Supón $i = 8\%$ y $n = 20$:

$$(1 + 0,08)^{20} \approx 4,661$$

$$\text{CRF} \approx \frac{0,08 \times 4,661}{4,661 - 1} = \frac{0,3729}{3,661} \approx 0,1019$$

Economía del H₂ verde y conceptos

Decisiones que controlan cada driver

- **Electricidad:** PPA largo; híbrido solar+eólica; autoabastecimiento; ubicación; gestión precio/hora.
- **CF:** diseño híbrido, sobredimensionamiento ERNC, almacenamiento, despacho.
- **CAPEX:** tamaño, estandarización, competencia OEM, EPC lump sum, abastecimiento anticipado.
- **OPEX:** contratos O&M, repuestos, integración utilidades.
- **Agua:** fuente segura, permisos, pretratamiento/desalación, recuperación.

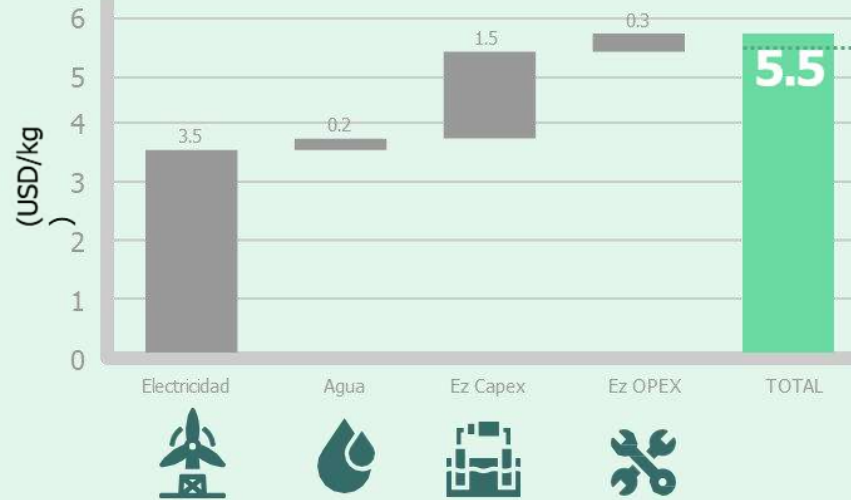
<https://hidrogenoverde.minenergia.cl/calculadora/>

Economía del H₂ verde y conceptos

Hidrógeno Verde

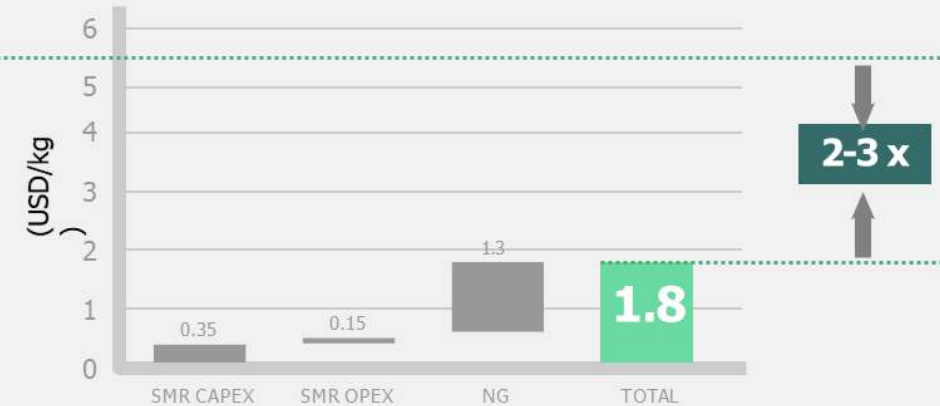


LCOH



Dados los costos actuales, el LCOH del hidrógeno a partir de fuentes renovables es 2 a 3 veces superior a aquel obtenido a partir de reformado de metano con vapor.

Hidrógeno Gris



Las principales variables que podrían afectar esta brecha son:

- **H₂ Verde:** LCOE, CAPEX Ez, WACC
- **H₂ Gris:** Costo Gas Natural, Impuesto al CO₂

HIDRÓGENO VERDE EN EL SEIA

La información contenida en este panel corresponde de manera exclusiva a **proyectos que declaran en su descripción de proyecto con alguna fase de la cadena de valor del Hidrógeno Verde o sus derivados**. Se incluyen aquellos que han tenido más de un ingreso al SEIA. Para visitar la información de otros proyectos le invitamos a visitar el buscador ..

Regiones



Proyectos de H2V ingresados al SEIA



Cadena de Valor del H2V



Inversión (USD)	Cant.	Estado
\$43.582M	18	Total de proyectos
\$0M	0	Abandonado
\$1.395M	7	Aprobado
\$0M	0	Caducado
\$1.327M	4	Desistido
\$0M	0	En admisión
\$40.830M	6	En calificación
\$30M	1	No admitido a tramitación
\$0M	0	No calificados/Término Anticipado
\$0M	0	Rechazado
\$0M	0	Renuncia RCA
\$0M	0	Revocado

Generación de energía renovable		
1	11	3
	Ingresados	Aprobados
Producción de Hidrógeno		
2	12	5
	Ingresados	Aprobados
Acondicionamiento y Almacenamiento		
3	12	5
	Ingresados	Aprobados
Reconversión		
4	7	2
	Ingresados	Aprobados
Transporte y distribución		
5	11	4
	Ingresados	Aprobados

Tipología de ingreso



PAS Aprobados



Mano de Obra



Tipología de ingreso	PAS Aprobados	Mano de Obra
1 b.1	138	En Calificación
	140	Aprobado
2 c	142	Construcción
	160	
3 b.2	139	Operación
	156	
4 ñ.3	161	Cierre
	132	
5 k.1	155	
	157	

7

* "Acuerdo 1998"



HIDRÓGENO VERDE EN EL SEIA

La información contenida en este panel corresponde de manera exclusiva a **proyectos que declaran en su descripción de proyecto con alguna fase de la cadena de valor del Hidrógeno Verde o sus derivados. Se incluyen aquellos que han tenido más de un ingreso al SEIA. Para visitar la información de otros proyectos le invitamos a visitar el buscador ..**

Producción



Días de evaluación en EIA



Sectores económicos



H2V
(ton/año)

En calificación	Aprobado
1.209.125	37.827



Energía Solar
(MW)

En calificación	Aprobado
2287	513



Energía Eólica
(MW)

En calificación	Aprobado
7.318	353



Amoniaco Verde
(ton/año)

En calificación	Aprobado
5687.000	18.000



Metanol
(ton/año)

En calificación	Aprobado
173.600	1.424



e-Gasolina
(ton/año)

En calificación	Aprobado
70.000	256



e-GL
(ton/año)

En calificación	Aprobado
8030	0

Calificación



145

Promedio días legales transcurridos de evaluación

Suspensión

495.0

Promedio de días totales de suspensión

Días de evaluación en DIA



Calificación



78.0

Promedio días legales transcurridos de evaluación

Suspensión

209.4

Promedio de días totales de suspensión

Participación ciudadana



Publicaciones

De proyectos ingresados

Part. ciudadana temprana	12
Negociaciones con interesados	2
Proyectos con PAC	8

Actividades

Actividades PAC realizadas	44
Actividades en marco art.86°	5
Actividades PCPI	0

Observaciones

Promedio de observaciones por DIA: **0,00**

Promedio de observaciones por EIA: **73,23**

de Personas Naturales **2.147**

de Personas Jurídicas **50**

de grupo de Per. Naturales **0**

Disponibles en el Centro de Documentación en
www.sea.gob.cl



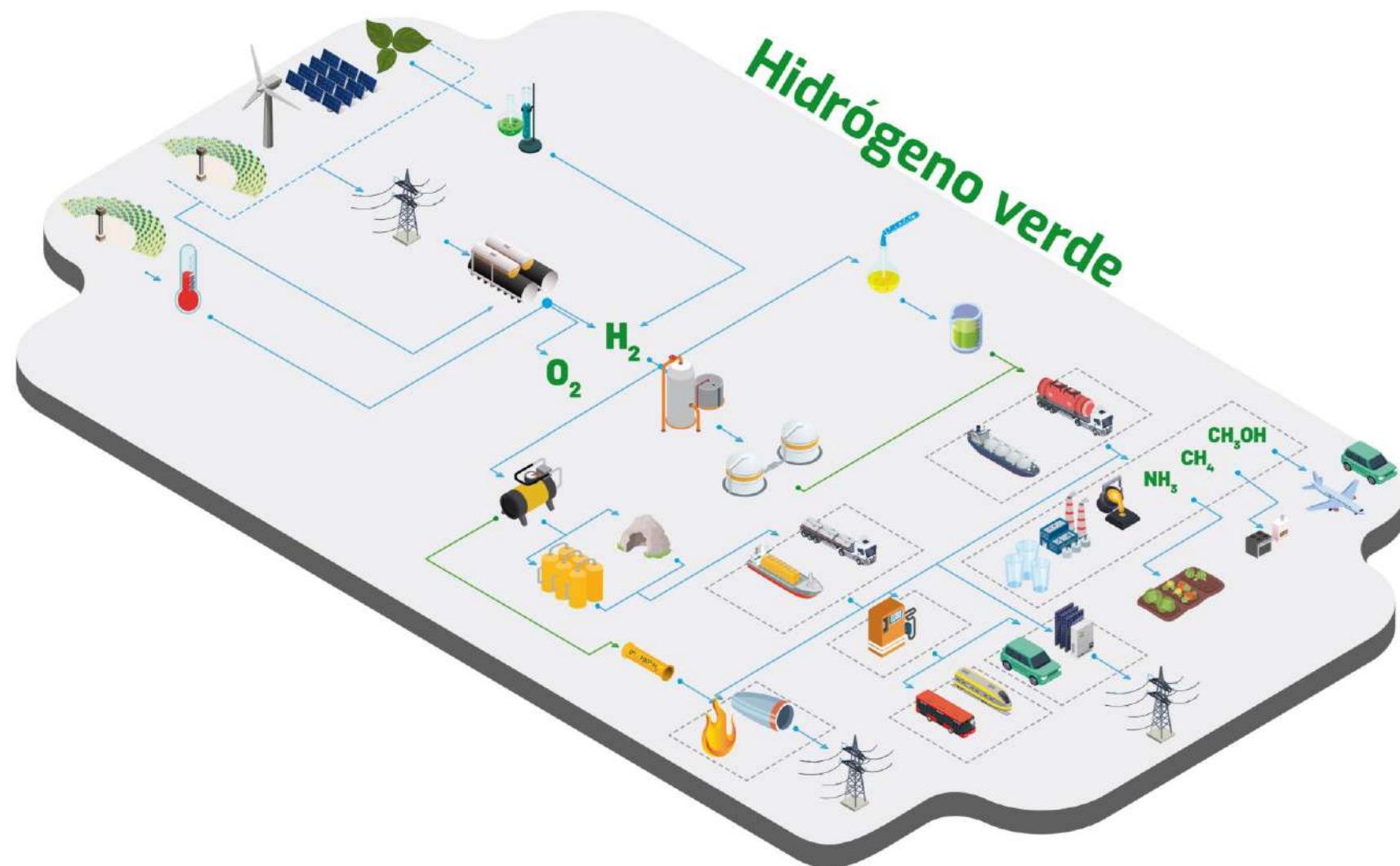
Descripción Integrada de proyectos para la generación de H2V en el SEIA (2023)



Introducción a los proyectos de hidrógeno verde (2022)..

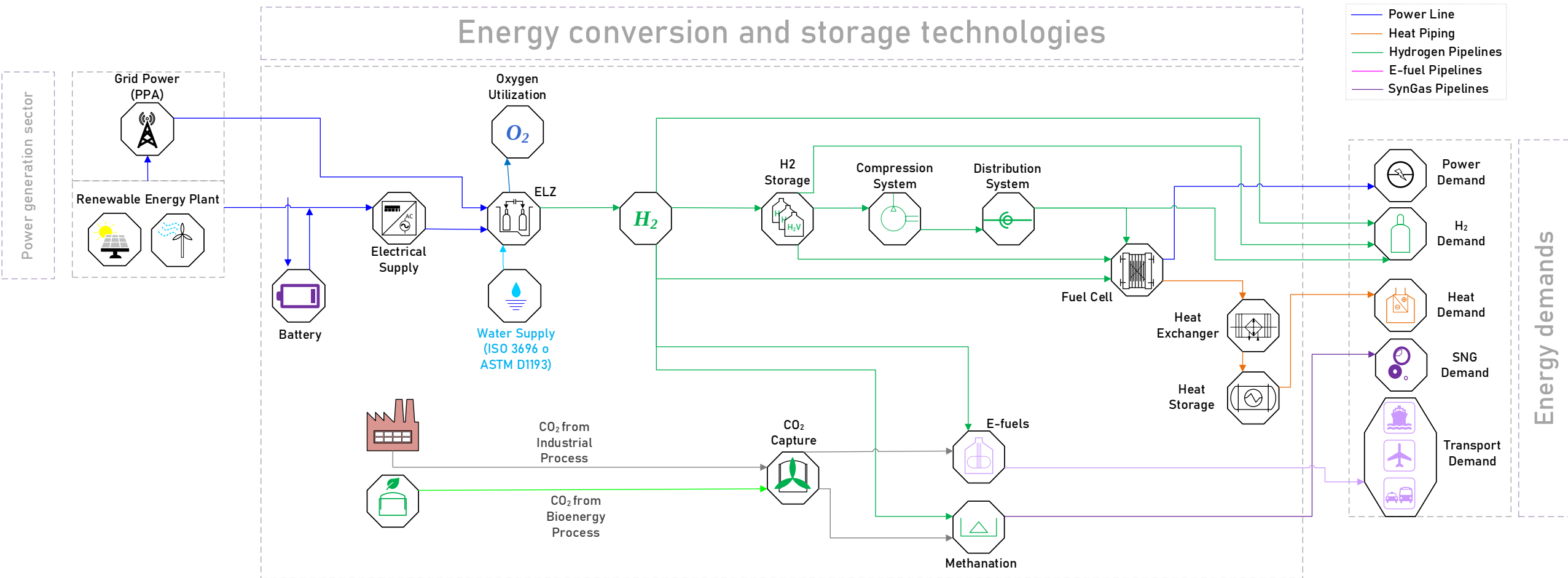


CADENA DE VALOR DEL H₂V

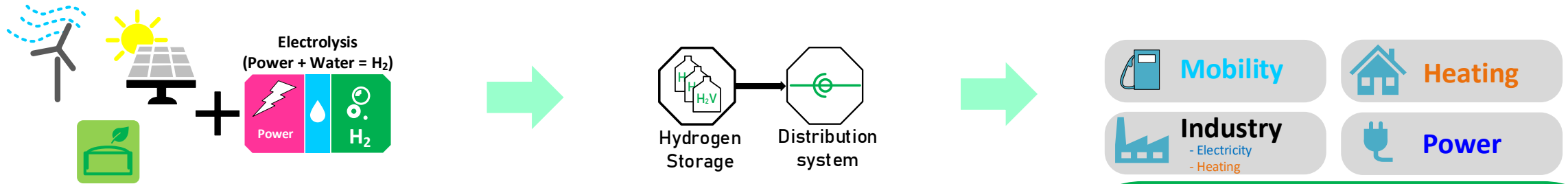


Fuente: <https://4echile.cl/recursos/cadena-de-valor-h2/>

Cadena de Valor del H2V



Actores Relevantes: Cadena de Valor del H2V



Generación:

Sistemas de energías renovables - RES (PV, Eólico y Biomasa)
Bancos de baterías (Almacenamiento BES)
Suministros eléctricos de las RES
Contratos PPA
Stacks de electrolizadores (alcalino, PEM, SOEC)
Sistemas de CCU (CO2 captura)
Sistemas de tratamiento de agua
Bombas (agua y solventes)
Purificadores de hidrógeno
Sistema de refrigeración
Almacenamiento y compresores de nitrógeno (purga)

Almacenamiento, Compresión y Transporte:

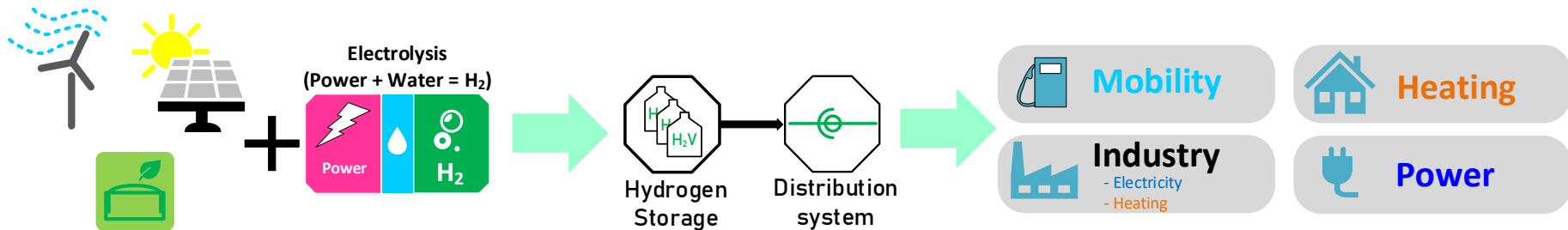
Compresores (baja, media y alta presión)
Estanques presurizados de gas hidrógeno (tipo I, II, III, IV)
Tube trailers
Calorímetros o cromatógrafos
Regulador/mezclador de gases
Gasoductos
Planta de Licuefacción (columnas, válvulas de expansión, separadores, aislación, sistemas de nitrógeno licuado, etc.)
Bombas de hidrógeno
Estanques criogénicos
Paneles de suministro
Remolques de estanques criogénicos
Otras Tecnologías de Almacenamiento:
Cavernas
Acuíferos y pozos de hidrocarburos
Silos subterráneos
Líquidos orgánicos (LOHC)
Hidruros metálicos
Estructuras de grafeno

Aplicaciones: Uso Final

Fuel Cell (PEM, SOFC)
Generación eléctrica
District Heating (Calor residencial)
CHP (Cogeneración)
Amoníaco
Fundición: Cobre, Acero y otros metales
Refinerías
Cemento
Turbinas
Motores
Calderas
Combustibles Renovables (e-etanol, metanol, gasolina, otros)
Syngas
Transporte (terrestre, marítimo y aviación)
Equipos de carga pesada y ligera (grúas, montacargas, cintas transportadoras, tractores, etc.)
Puertos de carga y graneleros

Actores Relevantes: Cadena de Valor del H2V

Transversales a
toda infraestructura
nueva de hidrógeno



Servicios:

- Formación de capital humano
- Investigación y desarrollo
- Público: Regulación y supervisión (auditorías), políticas públicas.
- Legales y financieros
- Informática
- Investigación de mercado y nuevos negocios
- Estudios ambientales, geotécnicos, arqueológicos y otros
- Ingeniería: Concepto, detalle
- Procurement, construcción/instalación (civil, mecánica y eléctrica)
- Mantenimiento
- Operación y gestión de activos
- Adquisición, análisis y gestión de datos
- Inspección y certificación de instalaciones de H2V
- Medición, testeo y metrología
- Telecomunicaciones
- Manufactura, importación y comercialización
- Ciclo de vida

Equipos/Instalaciones:

- Instrumentación y sistemas de control (electrónicos, neumáticos)
- Válvulas (control, presión, cierre automático)
- Materiales
- Ductos (piping) de gases y/o líquidos
- Electrónica de potencia (transformadores, rectificadores, choppers)
- Circuitos eléctricos (alta, media y baja tensión, cableado, cajas, paneles, interruptores)
- Intercambiadores de calor (enfriadores y calentadores)
- Detectores de gases y llamas
- Ventiladores
- Filtros
- Sistemas de control contra incendio
- Obras civiles (estructuras, fundaciones, soterramiento, drenajes, caminos, iluminación, sistemas de seguridad)

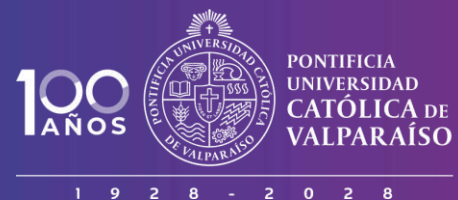
ACTIVIDAD 1: |Trabajo Grupal (30 min)

- 20 min trabajo en equipo
- 10 min exposición de las ideas

“Mapa de Valor ENAP”

- Usaremos herramienta (Miro o A3)
- Grupos de 6 personas
- Cada grupo identifica:
 - ✓ Eslabones
 - Integración de energía renovable
 - Producción H2
 - Conversión e-fuels (NH3/MeOH/LOHC)
 - Midstream/Transporte
 - Offtake/Clientes
 - Servicios/O&M/Trading
 - ✓ Capacidades actuales
 - ✓ Brechas
 - ✓ Socios potenciales





3.1. Cadena de valor del hidrógeno verde

Eslabones principales:

- 1.Generación renovable: solar, eólica, hidro.
- 2.Producción de H₂: electrólisis del agua (alcalina, PEM, SOEC).
- 3.Conversión química: síntesis de amoníaco (NH₃), metanol (MeOH), LOHC.
- 4.Almacenamiento y transporte: compresión, licuefacción, piping, shipping.
- 5.Offtake y uso final: refinación, movilidad pesada, generación eléctrica, industria química.
- 6.Servicios complementarios: O&M, certificación, trading, infraestructura portuaria.

Capacidades y oportunidades de ENAP

Eslabón	Capacidades actuales de ENAP	Brechas / desafíos	Potenciales socios
Generación renovable	Acceso a terrenos e infraestructura energética, experiencia en PPA.	No es generador principal de ERNC.	Generadoras renovables, Enel, Colbún, AES.
Producción de H ₂	Know-how en procesos industriales y operación continua; experiencia en refino y gas.	Necesidad de integración tecnológica (electrolizadores).	Fabricantes (Siemens, ThyssenKrupp, Haldor Topsoe).
Conversión química	Experiencia en amoníaco y metanol (refino).	Falta de infraestructura dedicada.	Socios químicos, universidades, CORFO.
Almacenamiento y transporte	Terminals, gasoductos, logística marítima y portuaria.	Adaptación a H ₂ o derivados; certificación HSE.	Navieras, CAP, Enaex, puertos.
Offtake industrial	Clientes actuales en combustibles y gas; acceso a industria pesada.	Desarrollar nuevos contratos verdes.	Mineras, cementeras, utilities.
Servicios / trading	Capacidad de gestión de riesgos, comercialización de energía.	Crear unidad H ₂ Trading / servicios O&M.	Traders internacionales, bancos, aseguradoras.

Principales “drivers” del LCOH

Driver	Descripción	Sensibilidad típica	Consideraciones para ENAP
Precio de electricidad	Costo del insumo energético (USD/MWh)	↑ 20 % → LCOH +12–15 %	Factor más determinante; ENAP puede acceder a contratos PPA o autogeneración renovable.
Factor de planta	Horas efectivas de operación del electrolizador	↓ 10 % → LCOH +8–10 %	Integración con renovables firmes (solar + eólica) reduce variabilidad.
CAPEX del electrolizador	Inversión inicial (USD/kW)	↓ 20 % → LCOH –10–12 %	Tendencia a baja global: 1 300 → 700 USD/kW al 2030.
OPEX	Costos de mantenimiento, agua, químicos, compresión	Menor efecto (<5 %)	ENAP posee experiencia operativa para optimizar estos costos.
Costo del agua	Relevante en zonas áridas	↑ 30 % → LCOH +2–3 %	Sinergia con proyectos de desalación propios o asociados.
Almacenamiento y transporte	Compresión, licuefacción o conversión (NH ₃ , MeOH, LOHC)	↑ 20 % → LCOH +5–8 %	ENAP tiene infraestructura logística existente que puede aprovechar.