

Innovación y desarrollo tecnológico para la cadena de valor del hidrógeno verde en Chile



Preparado para el Banco Interamericano de Desarrollo por:
Benjamín Maluenda

Junio 2023



Innovación y desarrollo tecnológico para la cadena de valor del hidrógeno verde en Chile

Clasificaciones JEL: L1, L2, L5, L6, O31, O32, O33, O34, O36, O38

Palabras clave: hidrógeno verde, innovación tecnológica, investigación y desarrollo, cadenas de valor, transición energética, descarbonización, cero emisiones netas, resiliencia climática, Chile, América Latina

Copyright © 2023 Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons CC BY 3.0 IGO (<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/igo/legalcode>). Se deberá cumplir los términos y condiciones señalados en el enlace URL y otorgar el respectivo reconocimiento al BID. En alcance a la sección 8 de la licencia indicada, cualquier mediación relacionada con disputas que surjan bajo esta licencia será llevada a cabo de conformidad con el Reglamento de Mediación de la OMPI.

Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil (CNUDMI). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID no están autorizados por esta licencia y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Nótese que el enlace URL incluye términos y condiciones que forman parte integral de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta obra son exclusivamente de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del BID, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



Banco Interamericano de Desarrollo
1300 New York Avenue, N.W.
Washington, D.C. 20577
www.iadb.org

El Sector de Instituciones para el Desarrollo fue responsable de la producción de la publicación.

Colaboradores externos:

Coordinación de la producción editorial: Sarah Schineller (A&S Information Specialists, LLC)

Revisión editorial: Julia Gomila

Diagramación: Miguel Lage (División de Competitividad, Tecnología e Innovación, BID)

Innovación y desarrollo tecnológico para la cadena de valor del hidrógeno verde en Chile

Preparado por Benjamín Maluenda para el Banco Interamericano de Desarrollo (BID)

Coordinación:

Vanderleia Radaelli. Especialista líder, División de Competitividad, Tecnología e Innovación (BID) y coordinadora del Clúster de Cambio Climático de IFD/CTI

Sandra López. Consultora, División de Competitividad, Tecnología e Innovación, BID

Colaboración:

Gina Cárdenas. Consultora, División de Competitividad, Tecnología e Innovación, BID

Nathália Amarante Pufal. Consultora, División de Competitividad, Tecnología e Innovación, BID

Prólogo

Este estudio se enmarca en las oportunidades que tienen los países de América Latina y el Caribe (ALC) para hacer frente a los desafíos que plantea el cambio climático; en particular, desde la perspectiva de innovación y desarrollo tecnológico en un tema de vanguardia: la cadena de valor del hidrógeno verde (HV). El análisis se centra en Chile, un referente natural en este sector. A su vez, representa el esfuerzo de la División de Competitividad, Tecnología e Innovación (IFD/CTI) del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) para aportar insumos que impulsen el desarrollo de una industria incipiente con soluciones económicamente viables y cuidadosas con el medioambiente.

El HV desempeña un papel fundamental en la transición energética. El hecho de que se encuentre en etapas tempranas de desarrollo requiere de esfuerzos masivos de financiación de investigación, desarrollo tecnológico e innovación a fin de posibilitar el despliegue de nuevos modelos de negocios. Los resultados de este estudio demuestran que existe un amplio abanico de oportunidades a lo largo de la cadena de valor del HV para avanzar decididamente hacia las metas de descarbonización industrial, que conforma una apuesta estratégica en materia de diversificación y sofisticación productiva y un aliado para impulsar la ciencia, la tecnología y la innovación, vinculando el despliegue con la investigación y el desarrollo local.

Sin embargo, transformar el modelo económico energético vigente no es tarea fácil. Las trayectorias tecnológicas sectoriales por lo general se fundamentan en modelos cuya base son los combustibles fósiles, sobre todo en los sectores con uso intensivo de capital. Resultan clave las políticas industriales y de innovación, con sus instrumentos de oferta y demanda, ya que contribuyen a destrabar fallas de mercado que surgen debido a la ausencia de una demanda suficiente y establecida, y crean condiciones habilitantes para acelerar el despliegue de la inversión privada y la ampliación del mercado. Asimismo, esas políticas promueven el desarrollo y la adopción de tecnologías que aún no están del todo maduras o que no fueron originalmente pensadas para proyectos innovadores de alto riesgo; a su vez, viabilizan el desarrollo de tecnologías que reducen los costos de producción y amplían su aplicación industrial, además de compensar el desfase de costos y riesgos en función del despliegue y las inversiones del sector privado.

Chile es uno de los primeros países de la región en apostar por el HV como elemento catalizador de su transición energética, con un enfoque en el desarrollo industrial sostenible. Desde 2018, el Grupo BID viene prestando apoyo a la región de ALC en

la creación de capacidades y el establecimiento de condiciones favorables que permitirán realizar inversiones exitosas en HV en las próximas décadas. En particular en el caso de Chile, en 2021 se aprobó un programa de apoyo a reformas de política dirigidas a acelerar la descarbonización de la matriz energética y su transición hacia la neutralidad del carbono. En este momento, se está diseñando un proyecto de inversión cuyo objetivo general es contribuir al desarrollo de la industria del HV y sus derivados en Chile a fin de contribuir a la descarbonización de la economía.

El presente estudio apunta a que, salvo algunas excepciones de escala global, las brechas tecnológicas para desplegar la industria del HV en Chile puedan ser zanjadas hoy con una combinación de proveedores locales e importadores de tecnología. Sin embargo, la disponibilidad de las tecnologías no asegura por sí sola el impulso de la industria. Existen desafíos de naturaleza comercial y normativa que también deben abordarse, tales como la brecha de costos entre el HV y los combustibles fósiles o la necesidad de contar con certificadores e instaladores en el país. Buena parte de estos desafíos podría resolverse mediante la innovación tecnológica, mientras que otra parte, mediante regulación, desarrollo de modelos de negocio o suministro de bienes públicos. Además, el impulso de una nueva industria puede generar oportunidades para la cadena de suministro asociada. Este estudio plantea oportunidades para aumentar esta captura de valor y propone acciones de política pública para llevarla a cabo; políticas que inevitablemente implican asumir costos y riesgos. Con base en un cuidadoso análisis de experiencias internacionales, testimonios de expertos y la mejor literatura disponible en el dominio público, se proponen medidas de mitigación y recomendaciones de diverso costo, riesgo y complejidad de ejecución para alcanzar una amplia serie de propósitos. La ruta precisa de implementación está por definirse, dado que debe lograrse un equilibrio en cuanto a criterios de eficiencia, equidad, sostenibilidad, adicionalidad, transparencia, simpleza, estabilidad y consistencia entre esta y otras políticas públicas.

Esperamos que las reflexiones expuestas en este documento estimulen las discusiones en todos los niveles y sectores a fin de facilitar el surgimiento del HV como tecnología de vanguardia en un mundo fuertemente basado en tecnologías que todavía utilizan combustibles fósiles. Los resultados apuntan a que sí es posible encontrar el equilibrio entre las exigencias del mercado, los crecientes requisitos de sostenibilidad, el desarrollo de la tecnología a través del HV y la lucha contra la crisis climática.

Vanderleia Radaelli

Especialista Líder, División de Competitividad, Tecnología e Innovación (BID) y coordinadora del Clúster de Cambio Climático de IFD/CTI

Sandra López

Consultora, División de Competitividad, Tecnología e Innovación, BID

Gina Cárdenas

Consultora, División de Competitividad, Tecnología e Innovación, BID

Nathália Amarante Pufal

Consultora, División de Competitividad, Tecnología e Innovación, BID

Índice

Introducción	1
1. La cadena de valor del hidrógeno verde	3
1.1. Casos internacionales de políticas de apoyo al hidrógeno	16
2. Brechas tecnológicas del hidrógeno verde en Chile	26
2.1. Estado de desarrollo de las tecnologías	27
2.2. Situación de proveedores en Chile	29
2.3. Análisis de complejidad económica	33
3. Recomendaciones de políticas públicas industriales y de innovación	46
3.1. Tendencias en las políticas industriales y de innovación en torno al hidrógeno verde	46
3.2. Posición estratégica de Chile	48
3.3. Recomendaciones	51
Referencias	58
Anexo	65



H_2

**GREEN
HYDROGEN**

Introducción

Se reconoce a Chile como uno de los principales candidatos a nivel mundial y líder en América Latina y el Caribe (ALC) en la producción de bajo costo de hidrógeno verde (HV), dadas la relativa alta calidad y la gran cantidad de recursos energéticos renovables, como son el solar y el eólico. El país viene impulsando medidas para acelerar la descarbonización de la matriz energética y su transición hacia la neutralidad de carbono en 2050. Para ello, se están tomando medidas tendientes a acelerar el despliegue de la industria nacional de HV de aquí a 2025 y poder exportar HV y sus derivados a partir de 2030. El Grupo BID ha acompañado el estudio, el diseño y la implementación de varias de estas medidas.

Este trabajo tiene como objetivo identificar las barreras y brechas asociadas a la cadena de valor del HV¹ en Chile a fin de habilitar su escalabilidad en la transición hacia una economía de cero emisiones netas y resiliente al cambio climático. El análisis de dichas barreras y brechas está enfocado en las necesidades de innovación; los desafíos científicos y tecnológicos; la creación de conocimiento, talentos y capacidades; los obstáculos para el desarrollo de proveedores, y los aspectos regulatorios. A partir de la identificación de estas brechas, el estudio plantea recomendaciones para el diseño de políticas públicas, y propone instrumentos e incentivos regulatorios en materia industrial y de innovación, con miras a acelerar la transición hacia una economía de cero emisiones netas en Chile.

Para visibilizar las oportunidades y desafíos que emergen de las interacciones entre los elementos de los sistemas técnicos y sociotécnicos relacionados con la cadena de proveedores y las tecnologías del HV en Chile, la metodología se basó en un análisis documental de las mejores prácticas y documentos estratégicos, y en entrevistas a empresas e instituciones relevantes de orden nacional e internacional.

¹ Hidrógeno verde (HV) aquí se refiere al que se produce a partir de la electrólisis de agua utilizando energía eléctrica proveniente de fuentes renovables, ya sea con o sin transmisión de dicha energía eléctrica.

Este estudio está estructurado en tres capítulos que siguen a esta sección introductoria. En el **primer capítulo** se presenta un mapeo de equipos, sistemas y grupos de servicios necesarios para desplegar la cadena de valor del HV en Chile. El capítulo incluye un análisis de los principales programas y políticas de innovación y apoyo al desarrollo tecnológico e industrial para capturar mayor valor en la industria del hidrógeno y del HV que se están desarrollando en Estados Unidos, España y Australia. También se realiza un análisis específico de la tecnología y manufactura de los sistemas de electrólisis, y de las brechas que implica su despliegue en Chile.

En el **segundo capítulo** se analiza el estado de desarrollo de las tecnologías necesarias para desplegar la cadena de valor del HV en Chile. El análisis apunta a que, aunque la mayoría están maduras desde el punto de vista comercial, aún existen necesidades importantes de desarrollo tecnológico y comercial en los segmentos de almacenamiento a gran escala y en las aplicaciones del gas. Resulta interesante notar que buena parte de las actividades de innovación aplicadas en Chile está en línea con la resolución de estos desafíos. Además, el capítulo hace una revisión de la disponibilidad de productores y proveedores de minerales clave, componentes, equipos y sistemas que componen la cadena de valor del HV en el país. Asimismo, el capítulo enumera hallazgos de estudios internacionales en torno a los conocimientos y habilidades que son necesarios en la fuerza laboral para desplegar la industria del HV, así como recomendaciones para abordar las brechas. Se incluye también un análisis comparativo de la complejidad económica entre Chile y Alemania, Australia, España y Namibia, países que comparten un variado nivel de diversificación en exportaciones y el interés en impulsar industrias de HV desde distintos roles.

Por último, en el **tercer capítulo** se proponen una serie de recomendaciones de políticas industriales y de innovación a partir de la posición estratégica de Chile respecto al desarrollo de capacidades tecnológicas y de manufactura en la cadena de valor del HV. Por otra parte, se identifican las principales tendencias mundiales en cuanto a políticas públicas de apoyo a la innovación y el desarrollo industrial.

1. La cadena de valor del hidrógeno verde

El despliegue de la industria del hidrógeno verde (HV) en Chile requiere de las tecnologías y plataformas tecnológicas necesarias para la producción, el acondicionamiento, el transporte, la distribución y la utilización de este vector de energía limpia. En este capítulo se identifican y mapean las actividades y los bienes y servicios requeridos a lo largo de la cadena de valor del HV y de las diversas etapas de despliegue de estos segmentos (planificación, diseño, construcción y operación). A partir del mapeo, se identifican las tecnologías y plataformas tecnológicas necesarias en cada segmento y etapa, incluidos tanto los recursos técnicos como el *know-how*.

Tanto la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde² del Ministerio de Energía del Gobierno de Chile como los planes e iniciativas presentados por actores privados³ contemplan la producción doméstica, el manejo y la utilización de HV en magnitudes mayores a las actuales. La implementación de estos planes requerirá del despliegue de cadenas de suministro completas dado que la producción y utilización de hidrógeno está hoy concentrada casi en su totalidad en dos refinerías de la Empresa Nacional del Petróleo con plantas de producción cautivas⁴ (Centro de Energía UC, 2020). Este hidrógeno actualmente se produce a partir de gas natural (denominado “hidrógeno gris”). La producción y utilización de HV en Chile está actualmente limitada a tres proyectos piloto operativos que totalizan una capacidad de producción ligeramente menor a 6 kg de hidrógeno por día (véase el recuadro 1), sin perjuicio de los múltiples anuncios de empresas acerca del desarrollo de proyectos piloto y proyectos de escala industrial que estarían funcionando en distintos plazos, tales como los seis proyectos de electrólisis a escala industrial cofinanciados por CORFO (CORFO, 2022).

² Disponible en: <https://www.energia.gob.cl/h2>.

³ El medio chileno *Diario Financiero* identifica 42 proyectos privados y público-privados de HV en desarrollo en Chile (<https://www.df.cl/empresas/juntas-de-accionistas/proyectos-de-hidrogeno-verde-en-chile-alcanzan-los-42-y-un-tercio-de>). Cabe destacar que se identifican proyectos a lo largo de toda la cadena de valor del HV, en todo orden de magnitudes (desde proyectos piloto hasta proyectos de escala industrial) y relacionados con una variedad de usos finales.

⁴ Estas plantas tienen una capacidad de producción aproximada nominal de 35.000 toneladas de hidrógeno gris al año.

Recuadro 1. Proyectos de hidrógeno verde en Chile

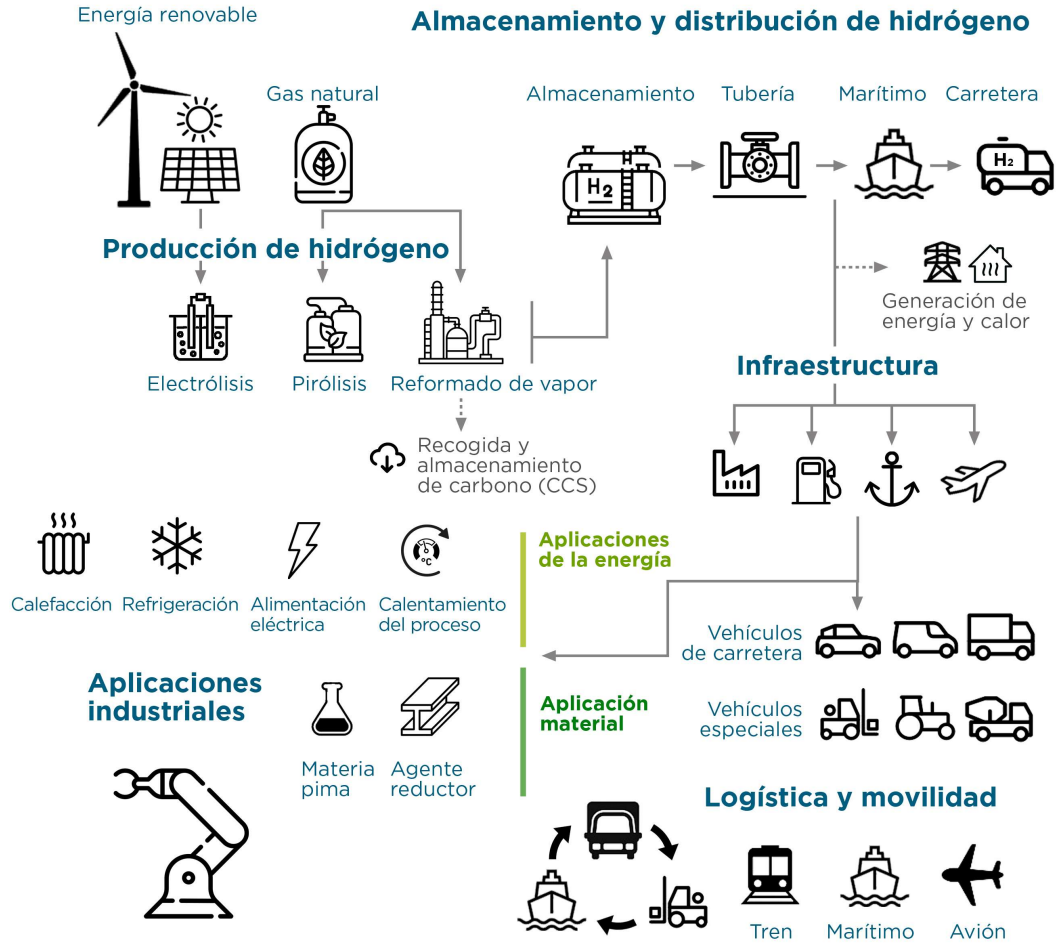
Los proyectos de hidrógeno verde (HV) identificados como actualmente operativos en Chile son: i) un electrolizador de 50 kW de potencia (capacidad para producir aproximadamente 1 kg de hidrógeno por día) instalado como parte del sistema de cogeneración de energía para el campamento de la Central Geotérmica Cerro Pabellón de la empresa Enel, con capacidad de almacenamiento de 37 kg de hidrógeno (Servicio de Evaluación Ambiental, 2016); ii) un electrolizador con capacidad de producción de 2 kg de hidrógeno por día de la empresa Anglo American, que alimenta una estación de carga de una grúa horquilla y una celda de combustible (Anglo American, 2021), y iii) una planta piloto móvil con la capacidad de producir 2,8 kg de HV al día, que será utilizada por el Centro Científico Tecnológico de la Región de Antofagasta (CICITEM) para estudiar el potencial de esa región (H2 LAC, 2022).

Se podría argumentar que la planta de electrólisis con capacidad para producir 18 kg de hidrógeno por hora de Air Products (antes, Indura), que abastece a la fábrica de Vidrios Lirquén en la región del Biobío, podría convertirse en una fuente de HV. Sin embargo, la empresa no ha declarado públicamente su intención de vincular un contrato de suministro eléctrico renovable con esa planta, ni planes para eventualmente certificar su hidrógeno como HV.

La cadena de suministro del hidrógeno puede ilustrarse de diversas maneras. Una taxonomía útil es la que se muestra en el gráfico 1, en el que se segmenta la producción, el almacenamiento, el transporte/distribución⁵ y los diversos usos. Cada segmento requiere de infraestructura, equipos y bienes y servicios para cumplir con sus funciones.

⁵ Con frecuencia, se utiliza la palabra “transporte” para describir el traslado de una masa o volumen significativo de hidrógeno entre dos puntos. Por su parte, la palabra “distribución” suele asociarse con la entrega de menores cantidades de hidrógeno a diversos puntos. No obstante, ambos términos suelen también intercambiarse en función del contexto (industria, cantidades, usuario final).

Gráfico 1. Cadena de valor del hidrógeno verde



Fuente: TÜV SÜD (2022).

Las cadenas de suministro pueden desplegarse utilizando diferentes tecnologías y tomando distintas decisiones de diseño. Las tecnologías desplegadas y su integración en los sistemas funcionales para cada segmento de la cadena de valor dependerán de las condiciones específicas de cada proyecto, así como de los objetivos, restricciones y recursos de sus diseñadores y promotores. El alcance de este estudio se enfoca en las siguientes soluciones tecnológicas por cada segmento de la cadena de valor del HV:⁶

- **Producción:** Electrólisis alcalina de agua (AWE, por sus siglas en inglés), de óxido sólido (SOEC), con membrana de intercambio de aniones (AEM) y con membrana de intercambio de protones (PEM).

⁶ A lo largo del informe se hace referencia a tecnologías distintas a las enumeradas en esta sección en la medida en que aportan a un análisis y discusión más completos.

- **Acondicionamiento:** Purificación, compresión y licuefacción.
- **Almacenamiento:** Gas presurizado y líquido criogénico.
- **Transporte:** Remolques de tubo (*tube trailers*) y gasoductos.
- **Aplicaciones:** Readecuación de camiones mineros, camiones de ruta y buses, mezclado (*blending*) en redes de gas, producción de amoníaco verde y uso en refinerías; aplicaciones industriales escalables en la producción de cemento, metanol y acero verde, y exportación de hidrógeno licuado y amoníaco verde.

En el gráfico 2 se identifican las actividades y los bienes y servicios requeridos a lo largo de la cadena de valor del HV y de las diversas etapas de despliegue de los segmentos. Es importante notar que, si bien los elementos descritos como transversales a toda la cadena de suministro del hidrógeno se encuentran generalmente presentes en todo proyecto de tamaño comercial, es posible que algunos proyectos de tamaño pequeño o que reutilicen infraestructura e instalaciones existentes no requieran de todos los equipos y servicios.

La taxonomía utilizada en el gráfico 2 y a lo largo del estudio considera un nivel de agregación intermedio entre componentes básicos (p. ej., membranas o electrolitos) y sistemas integrados (p. ej., una planta de electrólisis completa). Este nivel de agregación permite un análisis lo suficientemente detallado para detectar oportunidades y brechas.

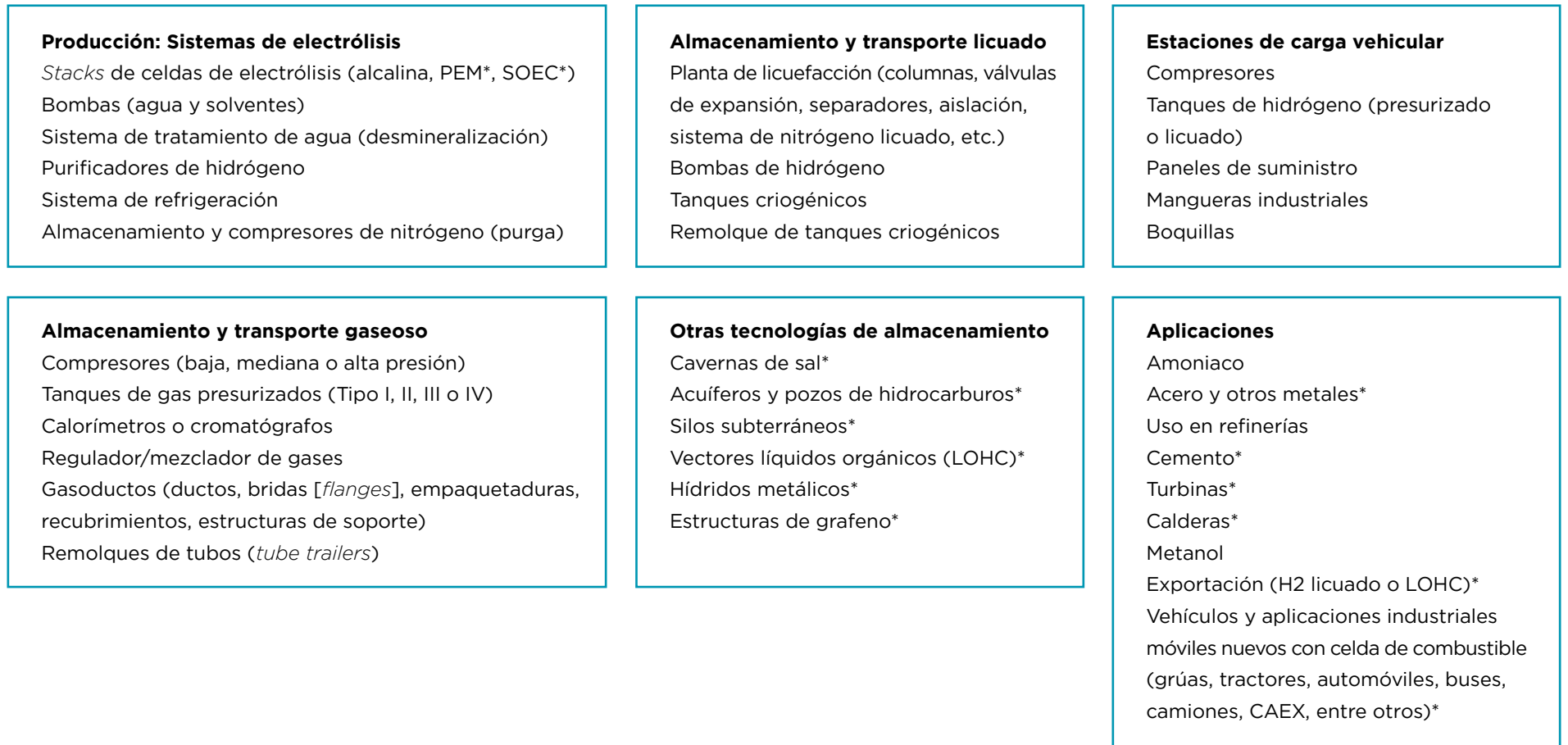
En el gráfico 2 también se observa que la mayor parte de la cadena de valor del HV está madura⁷ desde el punto de vista tecnológico y comercial en lo que se refiere a equipos y sistemas individuales. Es más, una parte importante de estos elementos se comparte directamente con otras industrias, mientras que en otros casos existe una aplicabilidad relativamente cercana de equipos de otras industrias a la del hidrógeno.⁸ Sin embargo, existen importantes iniciativas de desarrollo tecnológico tanto para mejorar el rendimiento y reducir los costos y riesgos de estos equipos y sistemas como para integrar estos elementos en cadenas de suministro que operen de manera eficiente y segura; en particular, las áreas de electrólisis, almacenamiento a gran escala, y aplicaciones distintas a refinerías de petróleo y producción de amoníaco concentran la mayoría de las tecnologías que todavía permanecen inmaduras.

⁷ Los niveles de madurez tecnológica y comercial de estos productos y servicios se basan en las definiciones de TRL y CRL (*Technology Readiness Level* y *Commercial Readiness Level*). Un análisis más detallado se presenta en el capítulo 2.

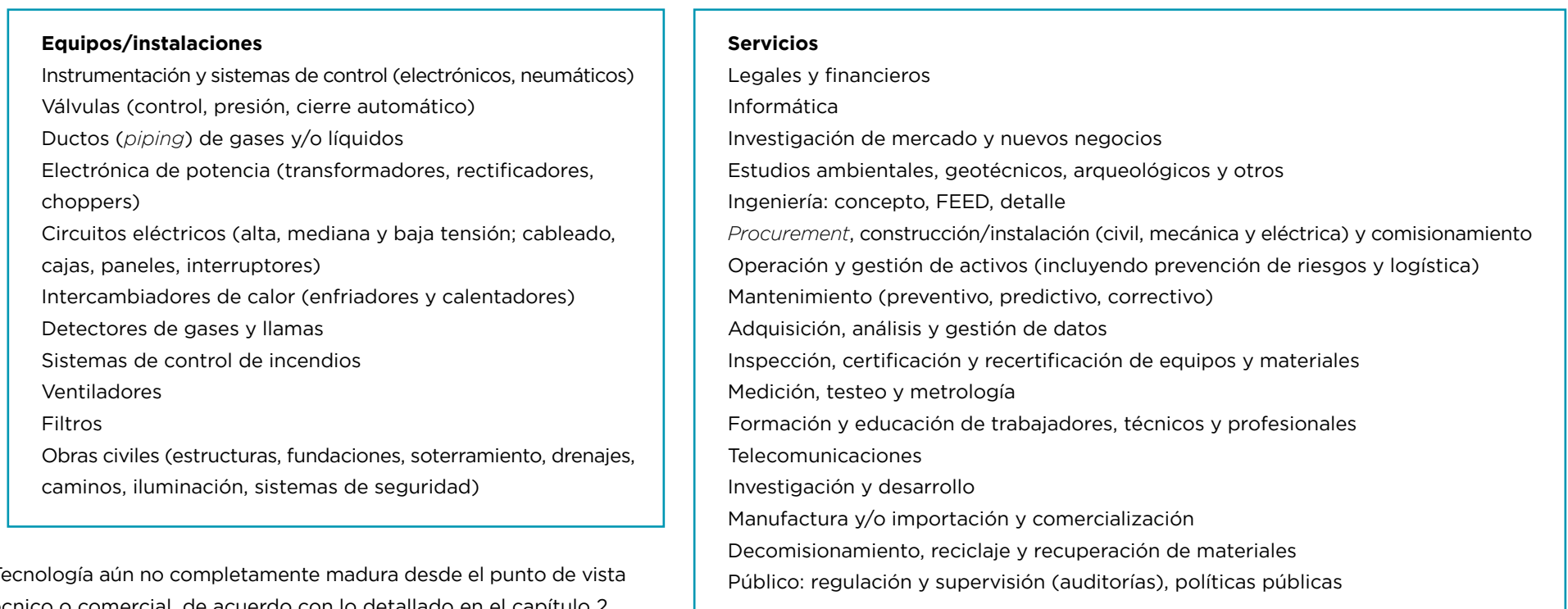
⁸ Ejemplos de tecnologías compartidas con otras industrias son la electrónica de potencia o los sistemas de purificación de agua. Las tecnologías cercanas a otras industrias, pero que involucran modificaciones específicas para ser utilizadas en la industria del hidrógeno incluyen, por ejemplo, válvulas y compresores.

Gráfico 2. Actividades y bienes y servicios requeridos a lo largo de la cadena de valor del HV

Segmentos de la cadena de valor del hidrógeno verde



Transversales a toda infraestructura nueva de hidrógeno



*Tecnología aún no completamente madura desde el punto de vista técnico o comercial, de acuerdo con lo detallado en el capítulo 2.

Fuente: elaboración propia sobre la base de entrevistas, y GIZ e Hincio Chile (2020); GIZ, ARIEMA Energía y Medioambiente S.I. y TCI Gecomp SpA (2021a); GIZ, ARIEMA Energía y Medioambiente S.I. y TCI Gecomp SpA (2021b); U.S. DOE (2022a) y Wood y Optimat (2022).

Por una parte, se observa que se requieren relativamente menos equipos y servicios de gestión de residuos que en otras industrias químicas. Esto se debe a que la mayoría de los residuos de esta cadena de suministro consideran oxígeno, hidrógeno y nitrógeno gaseosos,⁹ que se pueden ventear a la atmósfera en condiciones apropiadas.¹⁰ También consideran aguas residuales del proceso de purificación de agua, que generalmente pueden verterse a los sistemas de aguas servidas urbanas o a cuerpos de agua luego del tratamiento adecuado (GIZ e Inodú, 2020).¹¹

Por otra parte, el hidrógeno es considerado un gas peligroso debido a su inflamabilidad,¹² por lo que es necesario diseñar, construir y operar sus instalaciones siguiendo la normativa correspondiente y las mejores prácticas de seguridad. Estas pueden incluir la instalación de detectores de gases y/o infrarrojos, sistemas de control de incendios, estructuras de contención, entre otros.¹³

Un estudio estima que, incluso al considerar su licuefacción, almacenamiento, transporte en barco y regasificación en el puerto de destino, la producción representaría hasta 42% del costo nivelado del HV de aquí a 2030 (KBR, 2020). Por tanto, resulta relevante efectuar un análisis más detallado de las tecnologías de electrólisis y las barreras y oportunidades que presentan para su despliegue a escala en Chile (véase el recuadro 2).

⁹ El oxígeno es un subproducto de la electrólisis de agua. Una alternativa a su venteo a la atmósfera es su almacenamiento y comercialización en el mercado de gases industriales. El nitrógeno residual de la cadena del suministro del hidrógeno proviene de purgas de equipos e instalaciones realizadas para su apagado o encendido. El hidrógeno residual proviene mayormente de fugas a lo largo de la cadena de suministro. Estas fugas pueden totalizar entre 0,3% y 20% del hidrógeno producido, manejado y utilizado (Cooper *et al.*, 2022), dependiendo de las tecnologías empleadas, las características de la cadena de suministro (por ejemplo, distancias) y de los procesos y procedimientos utilizados en su manejo (por ejemplo, procedimientos de mantenimiento).

¹⁰ En Chile, la normativa precedente para determinar las condiciones en que se pueden almacenar y ventear sustancias inflamables, como el hidrógeno y el oxígeno, es el Decreto 148 de 2003 del Ministerio de Salud (Aprueba Reglamento Sanitario Sobre Manejo de Residuos Peligrosos). Además, todo proyecto industrial que se haya sometido al Sistema de Evaluación Ambiental deberá cumplir con los requisitos ambientales y de seguridad dispuestos en su respectiva Resolución de Calificación Ambiental. Por otra parte, es necesario que el proyecto considere las disposiciones del Decreto 40 de 1969 del Ministerio del Trabajo y Previsión Social (Aprueba Reglamento sobre Prevención de Riesgos Profesionales) (GIZ e Inodú, 2020).

¹¹ En Chile, la normativa precedente para determinar las condiciones en que se puede descargar este tipo de residuos líquidos es el Decreto 609 de 1998 del Ministerio de Obras Públicas (Establece Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Industriales Líquidos a Sistemas de Alcantarillado). Además, es necesario que el proyecto considere las disposiciones del Decreto 40 de 1969 del Ministerio del Trabajo y Previsión Social (Aprueba Reglamento sobre Prevención de Riesgos Profesionales) (GIZ y Inodú, 2020).

¹² De acuerdo con la Norma Chilena Oficial NCh382.Of98. El hidrógeno no presenta ninguna de las otras características de las sustancias peligrosas: corrosividad, toxicidad y reactividad.

¹³ Por ejemplo, el Reglamento de Seguridad de Instalaciones de Hidrógeno (DS13/2022 del Ministerio de Energía) establece “[...] los requisitos mínimos de seguridad que deberán cumplir las instalaciones de hidrógeno con fines energéticos [...]”.

Recuadro 2. Sistemas de electrólisis: segmento de producción de hidrógeno verde que acapara costos y concentra la atención de los investigadores y la industria

Tecnologías. Lo que comúnmente es referido como “electrolizador” es en realidad un sistema de electrólisis, formado por diversos componentes interconectados, que usualmente se separan en *stacks* (equipos en los que se produce la electrólisis) y balance de planta (conjunto de sistemas auxiliares que permite que los *stacks* funcionen de forma adecuada). En el centro de los *stacks* están las “celdas” de electrólisis: estructuras con dos electrodos metálicos y un medio de transferencia de iones. En las celdas es donde se producen las reacciones químicas que producen el hidrógeno a partir de agua. Las celdas se unen para formar *stacks* con mayor capacidad de producción de hidrógeno. Los *stacks* requieren de aislantes y empaquetaduras para separar las celdas entre sí, y de componentes para otorgar estabilidad estructural y mantener la presión necesaria para evitar fugas de líquido y gas. Por último, los *stacks* son integrados con sistemas auxiliares que permiten su adecuado funcionamiento, como son sistemas de suministro de agua y energía eléctrica, purificación y compresión de hidrógeno, refrigeración, tanques de almacenamiento, entre otros.

Existen diversas tecnologías de electrólisis. Por lo general, se las clasifica según el tipo de membrana que utilizan en sus celdas, aunque su nombre también puede originarse en el electrolito utilizado o la configuración de la celda. Cada familia de tecnologías tiene sus propias características tecno-económicas, se produce sobre la base de distintos materiales y se manufactura e instala con procesos propios. En el cuadro 2.1 se especifican algunas de estas características típicas para los cuatro tipos de tecnologías de electrólisis que en la actualidad la industria y los proveedores están desarrollando y desplegando a mayor escala.

(Continúa en la página siguiente)

(Continuación)

Cuadro 2.1. Características referenciales actuales de una selección de tecnologías de electrólisis de agua*

	Membrana de intercambio de protones (PEM)	Alcalina (AWE)	Óxido sólido (SOEC)	Membrana de intercambio de aniones (AEM)
Electrodos/catalizadores	Platino, paladio, iridio, rutenio, rodio	Platino, níquel, cobalto, hierro, cinc, aluminio, rutenio	Lantano, estroncio, manganeso, cobalto, níquel, circonio	Níquel, hierro, cobalto
Membrana/ electrolito	Ácido perfluorosulfónico (PFSA)	Separador: níquel, circonio Electrolito: hidróxido de potasio y de sodio	Itrio, circonio	Electrolito: hidróxido de potasio y de sodio
Capa porosa de transferencia	Titanio, platino	Acero, circonio, titanio, níquel	Níquel	Níquel, grafito
Eficiencia	++	+	+++	++
Vida útil	++	+++	+	-
Flexibilidad	+++ (puede seguir curvas de carga variables)	+(alto punto mínimo de operación)	+(largos tiempos de partida)	+++ (puede seguir curvas de carga variables)
Pureza de hidrógeno	+++	++	++	++
Costo unitario	↑↑↑	↑↑	↑↑↑↑	↑↑↑↑
Temperaturas de operación	20-100 °C	50-100 °C	>500 °C	40-60 °C

Fuente: Carmo *et al.* (2013); Grigoriev *et al.* (2020); Hauch *et al.* (2020); IRENA (2020a); Ansari *et al.* (2022); Kumar y Lim (2022).

Notas: * Las listas de materiales no son exhaustivas ni las características son absolutas. Los desarrollos específicos de las celdas de electrólisis pueden presentar características distintas.

Desafíos y focos de esfuerzo

1. Cuello de botella global en manufactura: A pesar de la evidente oportunidad para crear y capturar valor mediante la producción de *stacks* de electrólisis, la capacidad de manufactura y exportación de estos equipos es limitada y está **concentrada principalmente en Estados Unidos, Canadá, China, Corea del Sur, Japón, y algunos países de Europa, como Alemania, Francia, Noruega y Reino Unido**, entre otros. **Además de China, el único país en desarrollo con capacidad actual para producir y exportar electrolizadores de escala industrial es India** (U.S. DOE, 2022a). La manufactura de componentes, tales como membranas y catalizadores, está aún más concentrada; prácticamente su totalidad se produce en Estados Unidos, Alemania, Reino Unido y Japón (U.S. DOE, 2022a). La limitada capacidad de manufactura global es un desafío a la hora de lograr cumplir con los planes

de producción de hidrógeno verde (HV) que han publicado gobiernos y compañías en el mundo entero. Incluso considerando los anunciados planes de incremento de capacidad de manufactura de electrolizadores en 13 veces, desde 3,5 GW/año hasta 45 GW/año de aquí a 2025 (Hydrogen Council y McKinsey & Company, 2022), es posible que esta oferta sea incapaz de suplir la creciente demanda, estimada en un promedio de 85 GW de electrólisis al año en nueva capacidad entre 2020 y 2030, con miras a cumplir con la neutralidad del carbono del planeta de aquí a 2050 (IEA, 2022).

^a Consúltense, por ejemplo, la compañía Eastern Electrolyser Ltd. (<https://www.eeltdh2.com/>). Los fabricantes de electrolizadores en China e India ofrecen precios más bajos que sus competidores europeos o americanos. Sin embargo, la investigación y las entrevistas realizadas en el marco de este estudio revelan que existe un recelo de parte de los compradores americanos y europeos respecto a la vida útil y la eficiencia de estos equipos, por lo que prefieren pagar un premio por la certidumbre de rendimiento y certificación de los productos occidentales.

(Continúa en la página siguiente)

(Continuación)

2. Los minerales críticos y los materiales preciosos presentan altos costos y riesgos:

Un desafío significativo para el escalamiento de la capacidad de manufactura de electrolizadores es el suministro de metales y minerales necesarios. Por ejemplo, el Departamento de Energía de Estados Unidos identificó al iridio, itrio, platino y grafito como materiales que podrían presentar cuellos de botella para la producción de electrolizadores en ese país (U.S. DOE, 2022a), pues Sudáfrica concentra el 71% de la producción global de platino y 92% de la de iridio, mientras que China produce prácticamente el 100% del itrio (IRENA, 2020). Tanto instituciones públicas como actores privados con interés en desplegar el HV están desplegando esfuerzos para diversificar su suministro y reducir la cantidad de minerales críticos utilizados, dados los relativos altos precios de estos y los riesgos asociados a la concentración en sus puntos de extracción, procesamiento y manufactura.

3. El costo final del HV representa una barrera para el despliegue de la industria:

Los desafíos de capacidad de manufactura y de precios de metales preciosos necesarios en la producción de HV, sumados a la relativa falta de maduración y optimización de su diseño, manufactura, integración y operación, se traducen en altos costos actuales del HV frente a otros energéticos (tanto limpios como fósiles). Se están impulsando iniciativas de investigación y desarrollo (I+D) a nivel mundial a fin de resolver los desafíos y así reducir el costo de producción del HV. Algunos focos son (Grigoriev *et al.*, 2020; IRENA, 2020a; Ansari *et al.*, 2022; Kumar y Lim, 2022; EPO e IRENA, 2022):

- Reducir el consumo específico de energía (aumentar la eficiencia de conversión).
- Aumentar la vida útil de los *stacks*.
- Aumentar el tamaño de los *stacks*.
- Ampliar el rango de operación nominal (mínimo técnico y carga máxima).
- Reducir tiempos de partida.
- Automatizar y optimizar procesos de manufactura y ensamblado.
- Minimizar, reemplazar o eliminar el uso de metales preciosos y tierras raras.
- Desarrollar métodos de reciclaje y recuperación de metales de *stacks* decomisionados.

Las oportunidades y los focos de mejora enumerados se persiguen con distinto énfasis en función de la tecnología de electrólisis específica. Algunas distinciones y ejemplos figuran a continuación:

(Continúa en la página siguiente)

(Continuación)

AWE: Los esfuerzos se centran en utilizar nuevos electrolitos y membranas para aumentar la pureza del hidrógeno producido y aumentar la eficiencia de producción, mientras que se evita utilizar metales preciosos en sus electrodos y placas. Por ejemplo, la empresa japonesa Nippon Shokubai introdujo una nueva membrana para electrólisis alcalina con menor permeabilidad a los gases (Nippon Shokubai, 2020). Otros esfuerzos están dirigidos a lograr una operación más flexible de este tipo de tecnología, como el piloto de cuatro módulos de 0,8 MW que la empresa Asahi Kasei está construyendo en Kawasaki (Asahi Kasei Corp., 2022). Una línea de trabajo innovadora es la de celdas con carbonato fundido (MCEC), que aún debe resolver desafíos de costo por su necesidad de operar a temperaturas mayores a 600 °C.

PEM: Se están desplegando esfuerzos por desarrollar e implementar nuevos electrodos y capas de transferencia que utilicen menores cantidades de materiales escasos (o los reemplacen totalmente), así como nuevas membranas y placas que puedan producirse de manera masiva. Otros focos son la reducción del grosor de las membranas, de las pérdidas de gas y corriente en las celdas, y de la tasa de deterioro de los componentes. Empresas que han enfocado algunos de sus esfuerzos en generar *stacks* y plantas de electrólisis de mayor tamaño y potencia incluyen Siemens AG, ITM Power NEL y Hydrogenics (Cummins) (Grigoriev *et al.*, 2020). También existen iniciativas para lograr una operación segura de *stacks* de electrólisis a mayor presión y reducir las necesidades de compresión del gas a su salida (Grigoriev *et al.*, 2020).

SOEC: Los esfuerzos están concentrados en continuar el desarrollo tecnológico y escalar las capacidades de manufactura para desplegar los primeros pilotos a escala industrial. Sus altas temperaturas de operación presentan desafíos para el diseño mecánico de las celdas y *stacks*, y causan la degradación de los componentes cerámicos. Un avance reciente es la oferta comercial de módulos de electrólisis de óxido sólido de 10 MW y 1 MW por parte de las empresas americanas Bloom Energy (Bloom Energy, 2022) y FuelCell Energy (FuelCell Energy, 2022), respectivamente. Estudios académicos recientes han demostrado que las configuraciones actuales de celdas SOEC podrían llegar a niveles de confiabilidad suficientes para su despliegue industrial (Hauch *et al.*, 2020).

(Continúa en la página siguiente)

(Continuación)

AEM: Los esfuerzos están concentrados en mejorar el rendimiento y aumentar la vida útil, que se ve reducida por el daño acumulado que el electrolito alcalino produce en membranas, catalizadores y otros elementos (Kumar y Lim, 2022). La capacidad de las empresas que están desplegando la tecnología AEM –por ejemplo, Enapter– a fin de resolver estos desafíos sin aumentar significativamente el costo de las celdas será clave para definir si esta tecnología crecerá y capturará parte del mercado de la electrólisis. Otros desafíos incluyen reducir las pérdidas eléctricas para aumentar la eficiencia de las celdas y la pureza del hidrógeno producido (IRENA, 2020a). De todos modos, aún falta testear los sistemas AEM de escala de MW en contextos industriales, pues los equipos desplegados hasta ahora son de escala de kW.

Otras tecnologías: Existen otras tecnologías de electrólisis en desarrollo incipiente. Todo indicaría que no se han realizado mayores inversiones en investigación y despliegue de estas otras tecnologías debido a: i) la falta de claridad respecto de si efectivamente ofrecen ventajas netas significativas frente a las tecnologías dominantes, y ii) su necesidad de insumos adicionales a la electricidad, que pueden no encontrarse disponibles en cantidades suficientes o a costos competitivos en todas las geografías. Estos desarrollos incluyen: i) celdas de electrólisis microbiana (MEC), que utilizan microorganismos en sus cátodos para reducir el consumo eléctrico de la celda; ii) celdas fotoelectroquímicas (PEC), que utilizan la radiación solar para separar directamente las moléculas de agua dentro de la celda, sin necesidad de una corriente eléctrica externa; iii) celdas anfóteras, que utilizan tanto un electrolito ácido como uno básico, separados por una membrana, para producir hidrógeno y oxígeno a cada lado, y iv) celdas con electrolito ácido, que utilizan ácido sulfúrico diluido en agua como electrolito.

Algunas empresas han despertado el interés de los medios, la academia y la industria, dada su capacidad por atraer financiamiento e inversionistas para el desarrollo y la comercialización de nuevas tecnologías de electrólisis. Por ejemplo, HySata es una empresa australiana que declara haber diseñado una celda de electrólisis “capilar”, que alcanzaría una eficiencia de conversión de más de 95% mediante una nueva configuración y materiales que reducen la cantidad de burbujas producidas en el electrolito (Hodges *et al.*, 2022). Si bien este avance ofrece la posibilidad de crear un nuevo tipo de electrolizadores, la empresa aún no tiene un piloto en construcción.

1.1. CASOS INTERNACIONALES DE POLÍTICAS DE APOYO AL HIDRÓGENO

En esta sección se examina y describe el enfoque transversal de tres países que han ejecutado políticas de innovación y desarrollo tecnológico de la cadena de valor del HV. El análisis muestra que la matriz productiva actual de Chile no incluye productos que otros países frecuentemente fabrican en conjunto con los equipos y sistemas de HV estudiados, restándole al país ventajas comparativas para posicionarse como fabricante y exportador.

El primer caso de estudio es Estados Unidos, la mayor economía del mundo, por la amplitud y ambición de sus políticas de hidrógeno anunciadas en años recientes. El segundo caso es España, elegido no solo por su ambición de convertirse en exportador y consumidor de HV, al igual que Chile, sino también por sus políticas enfocadas en generar nuevas capacidades industriales y de manufactura. El tercer caso es Australia, un país que comparte gran parte de su posición estratégica y de sus ambiciones con Chile, además de presentar una matriz económica y exportadora similar. Los factores de similitud y diferencia entre Chile y estos países se resumen en el cuadro 1, el cual es meramente cualitativo y referencial y cuyo propósito es aportar al análisis de las políticas de los países examinados a la luz de sus similitudes o diferencias con Chile.

Cuadro 1. Comparación de factores entre Chile y casos internacionales de estudio

Dimensión	Índice utilizado	Estados Unidos	España	Australia	Chile
Tamaño de mercado interno	Producto Interno Bruto (BUSD 2021)	22.996	1.425	1.542	317
Complejidad económica	Economic Complexity Index (Ranking 2020)	12/133	33/133	91/133	76/133
Tamaño de gobierno nacional	Gasto público (BUSD 2020)*	9.396	509	574	70
Libertad económica	Index of Economic Freedom (Ranking)	25/161	41/161	12/161	20/161

Fuente: Banco Mundial (2023); CID Harvard (2023); FMI (2023) y Heritage Foundation (2023).

Nota: *Tasas de conversión utilizadas para 1 USD: Australia (AUD 1.454); Chile (CLP 791); España (EUR 0.878) (Estadísticas Monetarias y Financieras de la OCDE, consultada en diciembre 2022 [<https://stats.oecd.org>]).

A continuación, se describen las políticas industriales y de innovación que los países analizados vienen implementando hace 10 años para impulsar la industria del hidrógeno limpio.¹⁴ Es importante remarcar que las acciones enumeradas se enfocan en políticas dirigidas específicamente a esta industria, y que no conforman un listado exhaustivo de todas las políticas públicas transversales de innovación o de acción climática de los países analizados. El cuadro 2 resume las iniciativas de financiamiento identificadas; y luego sigue una descripción más detallada.

Cuadro 2. Resumen del financiamiento público para el desarrollo exclusivo de tecnologías y/o industrias de hidrógeno limpio en los países bajo estudio

	Estados Unidos	España	Australia
Fondos públicos ejecutados y comprometidos exclusivamente para el hidrógeno limpio a nivel nacional	USD 9.608 millones + subsidio de 15 USD/MWh a la energía renovable + subsidio de 3 USD/kg de H ₂ verde	EUR 1.555 millones	AUD 955 millones

Fuente: Elaboración propia en base a las fuentes referenciadas en esta sección.

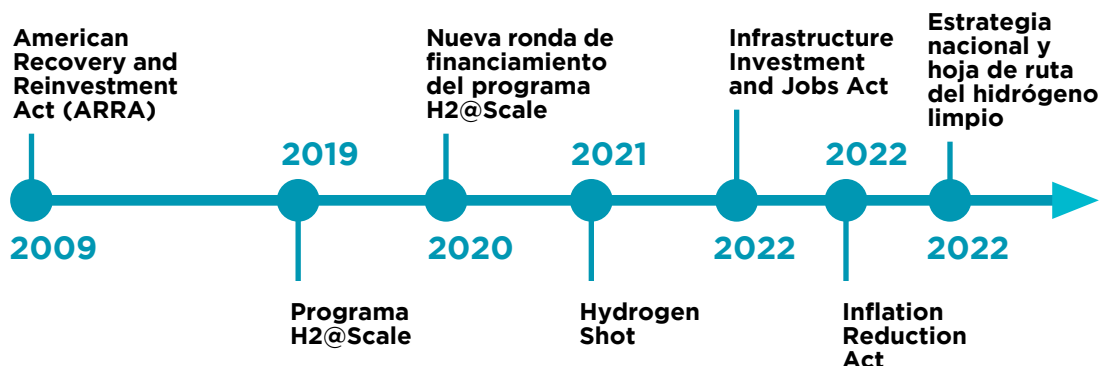
Estados Unidos

Si bien en su mayoría son países europeos los que han promovido el hidrógeno limpio con mayor fuerza y visibilidad a nivel nacional o federal en la última década, desde hace varios años Estados Unidos también ha puesto en marcha programas públicos de apoyo a la industria del hidrógeno. El financiamiento público de iniciativas en torno al hidrógeno se inició en la órbita de las industrias espacial y militar, con fines específicos y aplicabilidad civil limitada; sin embargo, los programas de tamaño relativamente menor han aumentado considerablemente después de la reciente promulgación de algunas leyes que contemplan la acción climática.

A continuación, se presenta un resumen de los programas relevantes (en el gráfico 3 figura una línea de tiempo resumida). Es importante notar que los programas se basan en la fuerte competitividad del país en la producción de equipos y componentes para la industria del hidrógeno. Por ejemplo, Estados Unidos ya cuenta con más de 10 empresas que producen electrolizadores y celdas de combustible, y con más de 10 productores de componentes para estos (por ejemplo, membranas) (U.S. DOE, 2022a).

¹⁴ Un gran número de programas públicos brindan apoyo tanto al HV, proveniente de agua y fuentes de energía eléctrica renovables, como a otros tipos de hidrógeno bajo en carbono, o limpio. Un ejemplo es el hidrógeno azul, que consiste en hidrógeno gris cuyas emisiones de carbono son capturadas y almacenadas o utilizadas.

Gráfico 3. Línea de tiempo de las políticas de innovación y desarrollo tecnológico de la cadena de valor del HV en Estados Unidos



Fuente: Elaboración propia.

2009: Se promulga la **American Recovery and Reinvestment Act (ARRA)**,¹⁵ una ley que permite apropiaciones de presupuesto para apoyar la reactivación de la economía de Estados Unidos luego de la crisis financiera de 2008. La ley destina USD 9,7 millones al cofinanciamiento de inversiones privadas en grúas horquilla con celdas de combustible. Se subsidió la adquisición de 713 grúas horquilla, mientras que otras 21.125 fueron financiadas por completo por el sector privado, con un total de más de 140 MW de potencia de celdas de combustible. Estas grúas se alimentan con hidrógeno proveniente de múltiples fuentes de producción.

2019: El **programa H2@Scale**¹⁶ administrado por el Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE, por sus siglas en inglés), adjudica USD 40 millones para investigación básica en readecuación de infraestructura, sistemas de almacenamiento y nuevas formas de electrólisis (U.S. DOE, 2019). Se eligen 29 adjudicatarios, de los cuales 19 son universidades, con un subsidio promedio de USD 1,38 millones. En general, la mayor parte de los temas de investigación se relacionan con el desarrollo de nuevos materiales y métodos de manufactura. Algunos proyectos son pilotos demostrativos de tecnologías existentes en casos de usos novedosos.

2020: Una **nueva ronda de financiamiento del programa H2@Scale** adjudica USD 58 millones para el desarrollo tecnológico en hidrógeno limpio (U.S. DOE, 2020). Casi USD 14 millones se destinan específicamente al desarrollo de nuevos métodos de manufactura escalables de celdas de electrólisis. En esta ronda, los proyectos adjudicados son más cercanos al desarrollo aplicado; solo 4 de los 18 adjudicatarios son universidades, mientras que el resto son empresas, entre las que se encuentran

¹⁵ <https://www.energy.gov/oe/2009-american-recovery-and-reinvestment-act>.

¹⁶ <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/h2scale>.

algunos de los más avanzados proveedores de la cadena de valor del hidrógeno limpio. Dada la naturaleza aplicada de los proyectos, el subsidio promedio en esta ronda fue mayor al de la ronda de 2019, y alcanzó los USD 3,2 millones.

2021: Por primera vez, el Gobierno Federal de Estados Unidos oficializa objetivos estratégicos en torno al hidrógeno limpio con su **Hydrogen Shot**,¹⁷ la meta de lograr un costo nivelado de hidrógeno limpio de USD 1/kg de aquí a 2030 (Satyapal, 2022). Este objetivo no viene acompañado de programas de financiamiento dedicados, pero resulta útil para alinear las prioridades de los actores públicos y del mercado, además de enviar una señal de compromiso a largo plazo con el hidrógeno bajo en carbono.

2022: Se promulga la **Infrastructure Investment and Jobs Act**,¹⁸ una ley que por primera vez destina un presupuesto considerable al desarrollo tecnológico e industrial del hidrógeno limpio a largo plazo. La ley considera la creación del programa **Clean Hydrogen Electrolysis**, cuyo monto asciende a USD 1.000 millones, y tiene por objetivo reducir los costos de los sistemas de electrólisis y aumentar su rendimiento (y así lograr el Hydrogen Shot). Además, destina USD 500 millones al programa Clean Hydrogen Manufacturing and Recycling Initiatives, el cual se enfoca en desarrollar capacidades productivas en torno a la cadena de suministro del HV, así como capacidades de reciclaje y recuperación de materiales. Por último, la ley crea el programa Regional Clean Hydrogen Hubs y lo dota de USD 8.000 millones, con el propósito de crear cuatro *hubs* diversos de hidrógeno limpio (no únicamente verde) a escala industrial y así acelerar la reducción de costos, el desarrollo tecnológico y la adopción en aplicaciones.

2022: Se promulga la **Inflation Reduction Act (IRA)**,¹⁹ una ley que, entre otras cosas, profundiza el financiamiento público a gran escala y largo plazo para el despliegue de tecnologías limpias en la economía de Estados Unidos. Se trata de la política pública con mayor volumen de financiamiento dedicado al hidrógeno limpio en el mundo hasta la actualidad. La ley contempla políticas de apoyo a la manufactura, desarrollo tecnológico y despliegue industrial, principalmente en forma de incentivos tributarios. De estos, USD 30.000 millones se destinan a la manufactura avanzada en industria energética, incluidos paneles solares fotovoltaicos, electrolizadores, aerogeneradores, entre otras tecnologías, así como a la producción y procesamiento doméstico de minerales clave para la transición energética, como litio y tierras raras, entre otros. Además, la ley crea un incentivo tributario de 15 USD/MWh para energía eléctrica proveniente de fuentes renovables, además de otro incentivo por 3 USD/kg

¹⁷ <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-shot>.

¹⁸ <https://www.energy.gov/articles/doe-fact-sheet-bipartisan-infrastructure-deal-will-deliver-american-workers-families-and-0>.

¹⁹ <https://www.energy.gov/lpo/inflation-reduction-act-2022>.

de HV. La escala de estos incentivos es la mayor que se haya registrado hasta ahora en el mundo. Un estudio estimó que esta ley reduciría el costo del HV de 3 USD/kg a 0,39 USD/kg antes de 2030 (Larsen *et al.*, 2022), lo que potencialmente convierte al HV de Estados Unidos en el más barato del mundo en base a su apoyo público.

2022: Se publica el borrador de la **Estrategia nacional y hoja de ruta del hidrógeno limpio**.²⁰ Entre sus objetivos se encuentra crear 700.000 puestos brutos de trabajo y un mercado de USD 140.000 millones antes de 2030 (U.S. DOE, 2022b). En cuanto a la cadena de suministro, la estrategia plantea consumir 10 Mton de hidrógeno limpio (tanto verde como de otras fuentes limpias) de aquí a 2030 y 50 Mton de aquí a 2050, con miras a habilitar las metas de descarbonización del país. La estrategia declara como ambición que Estados Unidos sea un país independiente en cuanto a la producción de hidrógeno limpio. Es más, especifica que se buscará reducir o eliminar la dependencia del país de importaciones de materiales que puedan producirse con hidrógeno limpio, como el acero, y que se reducirá o eliminará (en la medida de lo posible) la dependencia de importaciones de materiales, componentes y equipos a lo largo de la cadena de suministro del hidrógeno limpio.

Además de los abultados programas industriales publicados por el Gobierno Federal en el último par de años, el DOE también ha generado y financiado consorcios entre empresas productivas, proveedores de componentes y laboratorios nacionales en torno a los desafíos que plantea el desarrollo tecnológico. Por ejemplo, el programa H2NEW busca crear un *stack* de electrolizador PEM a un costo de USD 100/kW y una eficiencia de 70% antes de 2025. Este programa agrupa a nueve de los laboratorios nacionales del DOE, instituciones de vasta experiencia en investigación básica, desarrollo tecnológico e incubación de soluciones comerciales. Otro ejemplo de este tipo de consorcios es HyBlend, formado entre laboratorios nacionales, empresas y la academia una vez adjudicada una parte de los USD 8 millones que el DOE concursó en 2022 para investigar aplicaciones de hidrógeno con niveles TRL (Technology Readiness Level) más bajos. Este consorcio estudia el mezclado de hidrógeno en redes de gas y busca producir conocimiento y herramientas para su aplicación.

El DOE no solo ha dedicado fondos al desarrollo de tecnología, sino también a la formación de capacidades técnicas y profesionales. Por ejemplo, el programa H2EDGE²¹ tiene como objetivo desarrollar una fuerza de trabajo capaz de desplegar la economía del hidrógeno. Este programa de cuatro años cuyo monto es USD 2 millones fue adjudicado en 2020 al Electric Power Research Institute. Tiene como foco complementar los currículos universitarios de ingenieros y otras profesiones afines, así como también poner en marcha cursos y certificaciones.

²⁰ <https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/clean-hydrogen-strategy-roadmap.pdf>.

²¹ <https://grided.epri.com/H2EDGE.html>.

España

El caso de España es distinto al de países como Alemania o Australia, puesto que sus políticas de hidrógeno se enmarcan principalmente en los planes de recuperación económica desarrollados durante la pandemia de COVID-19, por lo que son relativamente más recientes. Además, el contexto de España es particular. Si bien no se trata de una economía completamente compleja que ya produzca prácticamente todos los equipos y servicios de la cadena de valor del hidrógeno –como Alemania o Estados Unidos–, sí cuenta con capacidades industriales cercanas a esta industria que pueden ser apalancadas. Por ello, puede observarse que sus políticas industriales y de desarrollo tecnológico en hidrógeno están enfocadas principalmente en adaptar las capacidades existentes y en atraer tecnologías extranjeras para lograr desplegar la economía del hidrógeno (en el gráfico 4 figura una línea de tiempo resumida).

Gráfico 4. Línea del tiempo de las políticas de innovación y desarrollo tecnológico de la cadena de valor del HV en España



Fuente: Elaboración propia.

2020: Se publica el borrador de la **Hoja de Ruta del Hidrógeno**.²² Esta estrategia define como objetivos instalar 300 MW de electrolizadores de aquí a 2025 y 4 GW de aquí a 2030, con miras a proveer al menos el 10% del hidrógeno de la Unión Europea. La hoja de ruta incluye medidas regulatorias, e incentivos de educación y fomento a la I+D+i.

2021: En el marco de la pandemia de COVID-19, se publica el **Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia**,²³ en el que se define un Componente 9 enfocado en hidrógeno (“Hoja de ruta del hidrógeno renovable y su integración sectorial”)

²² <https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/hidrogeno/default.aspx>.

²³ <https://planderecuperacion.gob.es/>.

(Gobierno de España, 2021). Este componente define cuatro líneas de trabajo que suman medidas por un monto de EUR 1.555 millones: i) enlazar pyme especializadas y centros tecnológicos, otorgando subsidios para instalaciones y equipos que permitan desarrollar, testear y certificar nuevas tecnologías; ii) crear al menos un acuerdo público-privado para un clúster industrial de hidrógeno limpio con un sistema de electrólisis a gran escala que provea a múltiples usuarios; iii) brindar apoyo a proyectos de inversión a menor escala a lo largo de la cadena de valor a fin de generar aprendizajes y demanda de hidrógeno limpio, y iv) respaldar proyectos de I+D+i nacionales para participar de fondos concursables, proyectos y consorcios europeos (por ejemplo, los Proyectos de Infraestructura de Común Interés Europeo [IPCEI]).

2021: Con el fin de implementar el Componente 9 del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, se publica el **Proyecto Estratégico para la Recuperación y Transformación Económica (PERTE) de Energías Renovables, Hidrógeno Renovable y Almacenamiento (ERHA)**.²⁴ Este proyecto se centra exclusivamente en la generación de demanda y desarrollo tecnológico y de capacidades industriales. El PERTE ERHA define ocho programas y convocatorias, entre los que se incluyen apoyo para hidrógeno en líneas de ensayo y manufactura, demostración de movilidad, sistemas de almacenamiento, electrólisis a gran escala, nuevas tecnologías de electrólisis y proyectos de cadena de suministro integrada.

2022: Los ocho programas y convocatorias del **PERTE ERHA** demoraron un tiempo en publicarse, pero la mayoría ya se encuentra en procesos de **Manifestación de Interés o Recepción de Propuestas**. Por ejemplo, está en marcha un proceso de Manifestación de Interés para proyectos de HV y almacenamiento en el Centro de Desarrollo de Tecnologías de la Fundación Ciudad de la Energía.²⁵ A través de este centro se cofinanciará la instalación de equipos y sistemas, y se otorgarán servicios para validar, testear y certificar las tecnologías resultantes. Otro ejemplo es la convocatoria para la entrega de subsidios por EUR 100 millones a grandes proyectos de electrólisis.²⁶

En general, estos programas y políticas de apoyo refuerzan tendencias en la industria privada del país que ya están en marcha. Por ejemplo, fabricantes de estanques de gases Tipo I, como IDESA y LAPESA, ya habían desarrollado capacidades para manufacturar estanques aptos y certificados para hidrógeno antes de que se

²⁴ <https://planderecuperacion.gob.es/como-acceder-a-los-fondos/ptertes/perte-de-energias-renovables-hidrogeno-renovable-y-almacenamiento>.

²⁵ <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/el-miteco-lanza-una-manifestacion-de-inter-de-inter>.

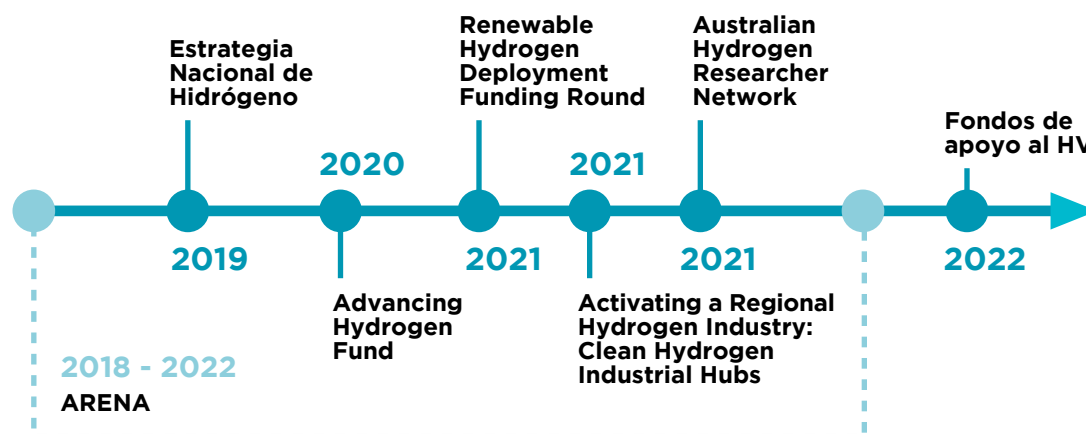
²⁶ <https://sede.idae.gob.es/lang/modulo/?refbol=tramites-servicios&refsec=cadena-valor-hidrogeno-renovable&idarticulo=146958>.

conocieran estos programas. En paralelo, empresas como Hiperbaric estaban adaptando sus capacidades a la nueva industria del hidrógeno. Se puede prever que los programas industriales y de desarrollo tecnológico en implementación contribuirán a catalizar las capacidades de la industria y reforzar los ecosistemas en formación. De este modo, se apoyan en las fortalezas existentes para producir el mayor impacto posible con el presupuesto dedicado.

Australia

Los esfuerzos por desarrollar una economía doméstica y de exportación de hidrógeno en Australia son de los primeros en el mundo, junto a líderes como Japón y Alemania. Dado lo mucho que su matriz exportadora depende de combustibles fósiles como el carbón y el gas natural, Australia definió que el hidrógeno limpio será uno de los energéticos hacia los que transitará su economía para mantenerse competitiva en un futuro sostenible. Australia comparte con Chile una complejidad económica relativamente baja, además de que ambos países cuentan con abundantes recursos energéticos renovables de alta calidad. No obstante, Australia presenta algunas diferencias, como su cercanía geográfica a los mercados asiáticos, un mercado interno de mayor tamaño y un mayor presupuesto público. Estos son los factores que su gobierno ha apalancado a fin de impulsar no solo cadenas de suministro de hidrógeno limpio, sino también proveedores y desarrollo tecnológico en torno a la industria. A continuación, se describen algunas de las iniciativas relevantes (en el gráfico 5 figura una línea de tiempo resumida).

Gráfico 5. Línea de tiempo de las políticas de innovación y desarrollo tecnológico de la cadena de valor del HV en Australia



Fuente: Elaboración propia.

2019: Australia publica su **Estrategia Nacional de Hidrógeno**,²⁷ la cual presenta una estructura adaptativa, sin fijar objetivos cuantitativos, sino cualitativos (por ejemplo, no define una cantidad específica a producir, sino el objetivo de ser de los primeros exportadores del mundo). La estrategia sí define ciertos índices cuantitativos para realizar el seguimiento de la industria. En el marco de esta estrategia, el Gobierno nacional ha financiado diversos programas y, por su parte, los gobiernos territoriales han definido políticas adicionales.

2020: Se crea el **Advancing Hydrogen Fund**,²⁸ un fondo público de inversiones de AUD 300 millones bajo la órbita de la Clean Energy Finance Corporation. Este ente se define como “banca verde”, un vehículo que el Gobierno australiano utiliza para financiar proyectos estratégicos de energía limpia. El fondo de hidrógeno abierto busca financiar (tanto mediante deuda como *equity*) proyectos a lo largo de toda la cadena de valor del hidrógeno limpio. Tiene como mandato invertir únicamente en proyectos de carácter comercial, por lo que en general financiará proyectos que utilicen tecnologías probadas, aunque esto no excluye que puedan utilizar tecnologías que aún no tengan amplia madurez comercial o que requieran de innovación en su integración.

2021: Se adjudica el **Renewable Hydrogen Deployment Funding Round**²⁹ de la agencia ARENA, la cual adjudicó subsidios a la inversión por un valor de AUD 103,3 millones a tres proyectos de 10 MW de electrólisis cada uno. Los proyectos son liderados por las empresas Engie, ATCO y Australian Gas Networks Limited; se trata de empresas grandes con amplia experiencia en el sector de energía y de infraestructura. Este programa es análogo al Primer Llamado para el Financiamiento de Proyectos de Hidrógeno Verde en Chile,³⁰ realizado y adjudicado por CORFO en 2021, cuya meta es atraer inversión privada, demostrar la electrólisis a gran escala y activar cadenas de proveedores en torno a los proyectos.

2021: Se crea el programa **Activating a Regional Hydrogen Industry: Clean Hydrogen Industrial Hubs**³¹ de AUD 464 millones para subsidiar el desarrollo de hasta siete *hubs* industriales. Estos *hubs* buscan no solo desplegar tecnologías maduras, sino también crear ecosistemas que puedan desarrollar soluciones locales. Por otra parte, un objetivo del programa es probar la integración de la cadena de suministro de hidrógeno con diversas aplicaciones. Cada *hub* debe tener proponentes o *sponsors*,

²⁷ <https://www.dcceew.gov.au/energy/publications/australias-national-hydrogen-strategy>.

²⁸ <https://www.cefc.com.au/where-we-invest/special-investment-programs/advancing-hydrogen-fund/>.

²⁹ <https://arena.gov.au/news/over-100-million-to-build-australias-first-large-scale-hydrogen-plants/>.

³⁰ <https://www.corfo.cl/sites/cpp/hidrogeno-verde-chile>.

³¹ <https://business.gov.au/grants-and-programs/hydrogen-hubs-development-grants>.

que pueden acceder a subsidios equivalentes a AUD 3 millones destinados a estudios de preinversión y a AUD 70 millones destinados a inversión (Commonwealth of Australia, 2021).

2021: Se crea el programa **Australian Hydrogen Researcher Network**³² de AUD 5 millones para fomentar la colaboración entre investigadores e industria. Este programa no solo genera conocimiento en forma de informes o conferencias, sino que también financia pasantías e intercambios internacionales y cataliza relaciones de colaboración en la academia y la industria.

2018-2022: En paralelo a los esfuerzos de despliegue de los proyectos ya listados, la agencia **ARENA** ha financiado proyectos de I+D+i por AUD 83 millones hasta la actualidad. De estos, AUD 22 millones se han destinado a 16 proyectos de investigación de tecnologías con TRL bajos liderados por universidades y centros de investigación. El monto restante se ha adjudicado a consorcios industriales o a la industria-academia, buscando generar soluciones aplicadas. La agencia tiene la capacidad de financiar un total de hasta AUD 300 millones para I+D+i, pues es el monto que ha comprometido el Gobierno nacional para estos programas (ARENA, 2022).

2022: Además de los **fondos de apoyo al HV**, el Gobierno nacional ha comprometido AUD 300 millones para la demostración y comercialización de tecnologías de captura y secuestro de carbono, tratándose de fondos a los cuales los proyectos de hidrógeno azul podrían acceder. Australia no cuenta con las capacidades para proveer estas tecnologías, lo que podría explicar la ausencia de programas para su desarrollo local.

Si bien la mayor parte de los programas e incentivos desplegados por el Gobierno de Australia no están dirigidos directamente al desarrollo de tecnología ni de capacidades de manufactura (en contraposición con los casos de España y Estados Unidos), el mero volumen de respaldo a la industria del hidrógeno limpio ha atraído iniciativas privadas de manufactura y desarrollo tecnológico. Por ejemplo, la *startup* Hysata planea producir electrolizadores PEM eficientes a partir de 2025 en el país mientras que CST Composites –una empresa australiana de estanques poliméricos– estableció una *joint venture* con la empresa americana Optimum Composite Technologies para explorar la producción de estanques de hidrógeno Tipo IV en Australia. En ambos casos, las empresas manifiestan tener previsto apalancar y escalar los incentivos desplegados por el Gobierno en torno a la cadena de valor del hidrógeno.

³² <https://ahrn.org.au/>.

2. Brechas tecnológicas del hidrógeno verde en Chile

El despliegue de la cadena de valor del hidrógeno verde (HV) en Chile requiere identificar y resolver las brechas tecnológicas existentes respecto de los equipos, materiales y servicios identificados anteriormente. En este capítulo se identifican los eslabones existentes y faltantes de proveedores de bienes y servicios especializados a lo largo de la cadena de valor. La identificación de las brechas tecnológicas incluye un análisis de madurez, tanto tecnológica como comercial, con el objetivo de definir hacia dónde enfocar las políticas públicas que busquen resolverlas. Las políticas pueden abarcar la promoción de investigación y desarrollo (I+D), la innovación aplicada, o directamente la adopción de tecnologías. Se presta especial atención a las oportunidades de generación de nuevas empresas y de capacidades técnicas.

En esta sección también se realiza un relevamiento referencial de las empresas existentes en Chile que podrían convertirse en proveedoras de algún segmento de la cadena de valor del HV, así como de aquellas que presenten capacidades evidentes de que con cierto esfuerzo podrían incorporarse a la cadena. Además, se lleva a cabo un análisis de más alto nivel sobre oportunidades de futuro desarrollo de las capacidades de manufactura en Chile, a través de la herramienta Atlas de Complejidad Económica³³ desarrollada por el Growth Lab de la Universidad de Harvard. Este análisis comparativo con otros países busca explorar la relativa dificultad o facilidad de generar nuevas capacidades industriales en Chile en torno al HV y las posibilidades de ganancia al hacerlo.

³³ Esta herramienta permite estudiar las capacidades productivas de los países y sus brechas (o “distancia”) respecto a la producción de nuevos bienes y servicios.

2.1. ESTADO DE DESARROLLO DE LAS TECNOLOGÍAS

El estado de madurez tecnológica y comercial de una tecnología se suele clasificar según las escalas de Technology Readiness Level (TRL, por sus siglas en inglés) y Commercial Readiness Level (CRL, por sus siglas en inglés) (gráfico 6).

Gráfico 6. Escalas de madurez tecnológica (TRL) y comercial (CRL) desarrolladas por el ARPA-E del Departamento de Energía de Estados Unidos



Fuente: Elaboración propia.

En el cuadro 3 se presentan estas clasificaciones para aquellas tecnologías identificadas en el capítulo 1 que aún no están comercialmente maduras. Las clasificaciones se definieron a partir de la revisión de literatura, notas de prensa y entrevistas. Es importante notar que, si bien se considera maduras a las tecnologías que no figuran en este cuadro, estas continúan siendo sujeto de iniciativas de desarrollo e innovación con el objetivo de seguir disminuyendo costos, mejorando el rendimiento y optimizando procesos para casos de uso futuros.³⁴ La relevancia del cuadro 3 en términos del despliegue de la cadena de valor del HV en Chile es definir las soluciones que aún no es posible desplegar a escala por una cuestión de falta de madurez.

Cuadro 3. Nivel de madurez de tecnologías aún no comercialmente maduras

En desarrollo tecnológico		Maduras tecnológicamente; en desarrollo comercial	
Tecnología	TRL (1-9)	Tecnología	CRL (1-9)
Vehículos con celdas de combustible	7-9*	Electrólisis PEM	6-8**
Transporte en buque (hidrógeno licuado o LOHC)	7-8	Hídridos metálicos****	7-8
Electrólisis AEM	4-7		
Electrólisis SOEC	5-7**	Acero verde	4-5
Turbinas	5-7	Cavernas de sal	4-5
Calderas industriales	5-7		
Acuíferos y pozos de hidrocarburos	3-4***		
Silos subterráneos	3-4		
Estructuras de grafeno	3-4		
Cobre verde	3		
Cemento	1-4		

Fuente: elaboración propia a partir de la revisión de literatura, notas de prensa y entrevistas.

Notas: * El nivel TRL depende del vehículo. Vehículos pequeños, como grúas horquilla, presentan madurez tecnológica en su reacondicionamiento. Vehículos pesados, como camiones mineros de alto tonelaje (CAEX), aún se están pilotando.

** Patonia & Poudineh (2022).

*** Existen proyectos que buscan la metanación del hidrógeno en pozos de hidrocarburos (tal como Hychico en Argentina), pero no se identificaron proyectos piloto comerciales de almacenamiento en estas estructuras.

**** Material que permite el almacenamiento de hidrógeno en su estructura molecular mediante la aplicación de presión y temperatura" (<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/metal-hydride-storage-materials>).

³⁴ Un ejemplo de estas tecnologías son los tanques de almacenamiento de hidrógeno gaseoso presurizado. Están en marcha iniciativas para desarrollar tanques más livianos, que soporten mayores presiones y que tengan mayor durabilidad (Yue *et al.*, 2021). Otro ejemplo es el diseño y la configuración de convertidores de voltaje optimizados para la electrólisis, que buscan reducir las pérdidas eléctricas y mejorar la confiabilidad (Yue *et al.*, 2021).

El bajo nivel de madurez de tecnologías que son fundamentales –en particular, ciertas aplicaciones– es una barrera para el desarrollo de una parte de la industria de HV en Chile. La falta de soluciones de utilización de este gas es un desafío al escalamiento de su demanda y, por tanto, de la creación de su mercado. En Chile, ya se han puesto en marcha diversos esfuerzos públicos y privados dirigidos a cerrar algunas de estas brechas. Por ejemplo, CORFO financió iniciativas de desarrollo tecnológico para lograr el reacondicionamiento de equipamiento móvil minero con celdas de combustible y motores duales. En la actualidad, otro consorcio cofinanciado por CORFO está probando un prototipo de tren de potencia de camiones mineros de alto tonelaje con hidrógeno (revista *Minería Chilena*, 2022). Además, existen iniciativas privadas para la producción de minerales y metales verdes que utilizan HV.³⁵ Por otra parte, se encuentra disponible una variedad de trabajos teóricos de investigación en electrólisis,³⁶ vectores orgánicos de transporte³⁷ y análisis técnico-económico de aplicaciones.³⁸ En general, se observa que los esfuerzos de I+D que están en marcha en Chile se alinean con las brechas y las necesidades de la industria de HV global.

En la medida en que escale la industria del HV en Chile, la falta de madurez de tecnologías de almacenamiento a gran escala podría significar una barrera adicional. No se identificaron iniciativas de desarrollo tecnológico en este segmento en Chile.

2.2. SITUACIÓN DE LOS PROVEEDORES EN CHILE

En Chile se presentan brechas y oportunidades específicas a lo largo de la cadena de valor del HV para proveedores que podrían insertarse en sus diversos segmentos. Por una parte, es de interés explorar las oportunidades de suministro de minerales y metales a esta nueva industria, dada la competitividad en el sector minero que presenta el país. Por otra parte, resulta fundamental examinar la disponibilidad y el origen de las tecnologías maduras que se requieren para el despliegue de los proyectos.

³⁵ Por ejemplo, la iniciativa de Siderúrgica Huachipato para producir acero verde (https://www.capacero.cl/cap_acero/fabricar-aceros-de-manera-sostenible-el-proyecto-de-cap-para-usar/2022-01-06/122230.html).

³⁶ Por ejemplo, véase la estimación de reducción de costos de HV mediante la recirculación de calor residual de electrólisis realizada por Contreras Bilbao (2021) (<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.016>).

³⁷ Por ejemplo, véase la estimación de costos de exportación de HV mediante diversos vectores de Chile a Japón realizada por Gallardo *et al.* (2021) (<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.050>).

³⁸ Por ejemplo, véase la herramienta de evaluación de proyectos de producción y utilización de HV producida por GIZ (<https://4echile.cl/proyectos/herramienta-para-evaluar-proyectos-de-produccion-de-hidrogeno-verde/>).

Minerales y metales

En el capítulo 1 se discutió acerca de la necesidad de minerales clave en la fabricación de sistemas de electrólisis. Estos recursos reciben hoy renovada atención por el potencial tamaño del mercado, los altos precios relativos y la presencia de riesgos debido a la concentración geográfica de su suministro. En el cuadro 4 se muestra su disponibilidad en Chile.

Cuadro 4. Disponibilidad en Chile de minerales y metales necesarios para la fabricación de electrolizadores y celdas de combustible

	Electrolizadores PEM	Celdas de combustible PEM	Electrolizadores y celdas de combustible de óxido sólido
Existe producción doméstica actual	Hierro (17,7 Mton/año)*		
No existe producción doméstica actual, pero existen yacimientos identificados	Titanio**		Manganeso*** Cobalto*** Níquel*** Lantano e itrio****
Sin presencia identificada	Platino Iridio	Platino Grafito	Circonio Estroncio

Fuente: elaboración propia en base a las fuentes referenciadas.

Notas: * Servicio Nacional de Geología y Minería (2022).

** El proyecto Cerro Blanco, que se ubicará en la Región de Atacama, tiene una Resolución de Calificación Ambiental aprobada desde 2015 para extraer mineral de titanio y procesarlo y así obtener 73.000 toneladas al año de concentrado de dióxido de titanio. Este proyecto no ha comenzado su construcción.

*** Townley, Díaz y Luca (2017).

**** Con el proyecto BioLantánidos (también llamado El Cabrito) de la empresa BioLantánidos controlada por Hochschild Mining plc se procuraba producir estos elementos, entre otros, tierras raras, en Penco. El proyecto fue retirado del SEIA en 2022 luego de una desfavorable consulta ciudadana. La empresa, con su nuevo nombre "Aclara", anunció que preparará un nuevo ingreso del proyecto al SEIA, que se llamará "Módulo Penco" (diario *Concepción*, 2022). Cochilco (2016) ha identificado potenciales depósitos de tierras raras en arcillas en la Región del Maule, depósitos de hierro y uranio en la Región de Atacama, así como en relaves de la minería del cobre. Sin embargo, ninguno de estos potenciales depósitos se considera económicamente viable para su explotación.

Además de los minerales enumerados en el cuadro 4, cabe destacar que en Chile se producen 1,2 millones de toneladas de acero al año, que equivalen aproximadamente a 30% del consumo nacional. Este metal se utiliza no solo en la fabricación de electrolizadores y celdas de combustible, sino también en otros segmentos de la cadena de valor del hidrógeno; por ejemplo, en tanques de almacenamiento o ductos.³⁹

³⁹ Es importante notar que existe una plétora de tipos de acero, los que contienen aleaciones de hierro y carbono con otros metales, tales como cromo, níquel, manganeso, boro o molibdeno, entre otros. Cada aplicación de este metal requiere de composiciones con rangos de concentración específicos.

Equipos y sistemas

Chile tiene industrias para las cuales se producen una variedad de equipos y componentes que también se utilizan en la cadena de valor del HV. Además, es un país abierto al comercio internacional,⁴⁰ por lo que otra gran parte de los equipos y componentes son importados por empresas que tienen operaciones de comercialización, distribución y/o posventa en Chile. Sin embargo, parte de los equipos y sistemas identificados como necesarios para la cadena de valor del hidrógeno no se comercializan en la actualidad en Chile, y no se tiene certeza de que existan las capacidades para certificarlos, instalarlos, comisionarlos, operarlos y realizarles mantenimiento.⁴¹

Si bien algunos de esos equipos y sistemas podrían ser importados por empresas que ya tienen cadenas de suministro similares y mantienen relaciones comerciales con proveedores internacionales adecuados, hay otros equipos y sistemas para los cuales hoy en día no existe necesariamente en el país esa capacidad de importación y posventa. Una clasificación en las categorías de equipos y sistemas identificados en este estudio figura en el cuadro 5, construida en base a investigación de escritorio y entrevistas. El cuadro 5 únicamente considera las capacidades de comercializar o fabricar localmente a escala industrial; se excluyen las capacidades de producir prototipos.

⁴⁰ Chile tiene 16 Tratados de Libre Comercio, que incluyen a las más grandes economías del mundo.

⁴¹ Esta falta de capacidades se refiere de manera general a capacidades técnicas (conocimiento y *know-how* institucional); humanas (técnicos y profesionales con capacitación adecuada), y de certificación.

Cuadro 5. Referencia de situación actual de proveedores de equipos y sistemas maduros tecnológicamente para la cadena de valor del HV en Chile

No necesariamente existe hoy la capacidad de instalar, comisionar, operar y mantener estos equipos/instalaciones		Existe hoy la capacidad de instalar, comisionar, operar y mantener estos equipos/instalaciones	
No se identifican proveedores	Se identifican importadores/usuarios con cadenas de suministro similares	Se identifican importadores/usuarios con cadenas de suministro existentes	Se identifican fabricantes
Mezclador de gases	Compresores de hidrógeno (ej.: Atlas Copco)	Bombas de agua y solventes (ej.: Koslan)	Válvulas y reguladores de GLP (ej.: Cemco Kosangas)
Remolques de tanques criogénicos	Tanques de hidrógeno licuado (ej.: Air Liquide)	Compresores de aire y otros gases (ej.: Ingersoll Rand)	Intercambiadores de calor (ej.: Intercal, INPPA)
Boquillas de carga vehicular	Bombas de hidrógeno licuado (ej.: Air Liquide)	Purificadores de gases (ej.: Air Liquide, Linde)	Ventiladores (ej.: Estrumec, Ati Clima)
	Plantas de licuefacción de hidrógeno (ej.: Air Liquide)	Sistemas de nitrógeno (ej.: Air Liquide, Linde)	Transformadores (ej.: Rhona, Tusan)
	Cilindros y tanques de hidrógeno Tipo II, III y IV*	Válvulas de hidrógeno (ej.: Air Liquide, Linde)	Instrumentos de presión y temperatura (ej.: Veto)
	<i>Tube trailers</i>	Sistemas de tratamiento de agua (ej.: Soltex)	Ductos y tuberías metálicas (ej.: Inamar/Vapor)
	Paneles de suministro	Inversores, rectificadores, <i>choppers</i> (ej.: Powerinverter)	Componentes eléctricos (ej.: Rhona)
	Mangueras de hidrógeno alta presión	Cilindros y tanques de hidrógeno Tipo I ³⁰ (ej.: Air Liquide, Linde)	Sistemas de control de incendios (ej.: Rally S.A.)
	Vehículos con celdas de combustible (ej.: Hyundai-Indumotora)	Sistemas de control (ej.: Soltex)	Filtros (ej.: Filtromet)
	Calderas de hidrógeno (ej.: Bosch)	Detectores de hidrógeno y sensores infrarrojos (ej.: Airevital)	
	Turbinas de hidrógeno (ej.: General Electric)	Electrolizadores (ej.: Cummins)	
		Ductos poliméricos (ej.: FastPack/Soluforce)	
	Celdas de combustible (ej.: TRA-Busso Group)		

Fuente: elaboración propia en base a investigación de escritorio y entrevistas.

Notas: * Los tanques de almacenamiento de Tipo I consisten en recipientes metálicos (usualmente, de una aleación de acero). El Tipo II se refiere a tanques metálicos reforzados con fibra de carbono o vidrio. Los tanques de Tipo III están compuestos casi en su totalidad por fibras de carbono o vidrio, además de un recubrimiento metálico interno. El Tipo IV se refiere a tanques poliméricos. Los tipos de tanque varían en costo, peso y presión máxima, por lo que son usualmente utilizados en distintas aplicaciones.

Desplegar la cadena de valor completa del HV en Chile requerirá en alguna medida de todos los equipos y sistemas enumerados en el cuadro 5. Algunos componentes se utilizan específicamente en un segmento (como las boquillas utilizadas para la carga de vehículos), mientras que otros se utilizan transversalmente en la cadena de valor (como válvulas y ductos). Los desafíos para el escalamiento de la industria varían según la categoría de los equipos.

En el caso de los equipos y sistemas para los que aún no existen proveedores instalados en Chile, se necesitaría generar importadores, establecer oficinas comerciales locales de empresas extranjeras o fomentar productores locales. En el caso de productos para los que ya existen importadores (ya sea que actualmente se importan esos productos al país o que se cuenta con líneas de suministro similares), los desafíos son: i) estructurar soluciones específicas para la industria doméstica y de exportación de HV; ii) asegurar un flujo suficiente de equipos para permitir el escalamiento de la industria, y iii) explorar la incorporación de tecnología o manufactura local en la cadena de producción si es que esto permite reducir costos, aumentar disponibilidad y/o adaptar los productos a los casos de uso específicos de Chile. También existen desafíos cuando ya se hayan identificado productores locales de ciertos equipos y sistemas: i) se necesitará escalar la capacidad de producción para cubrir la demanda de la nueva industria del HV; ii) probablemente deberán modificarse los diseños y la fabricación para adaptarlos a casos de uso específico, y iii) se deberá trabajar en la integración técnica con otros equipos de la cadena de valor.

2.3. ANÁLISIS DE COMPLEJIDAD ECONÓMICA

La factibilidad de desarrollo de nuevas actividades de fabricación de equipos y componentes en Chile requiere analizar las capacidades de manufactura actuales y compararlas con las capacidades que se necesitan para generar los productos requeridos por la cadena de valor del HV. Dado que un análisis de capacidades de manufactura es una tarea intensiva en términos de recursos y que debe ejecutarse de manera específica para cada producto, resulta eficiente utilizar herramientas estadísticas que permiten analizar la cadena de valor completa. Una de estas herramientas es el Atlas de Complejidad Económica (de aquí en adelante, “Atlas”), desarrollado por el Growth Lab del Centro de Desarrollo Internacional de la Universidad de Harvard.⁴²

⁴² <https://atlas.cid.harvard.edu/>.

⁴³ Ibid.

Este centro de investigación define a la complejidad económica como “una medida del conocimiento de una sociedad, expresada en los productos que esta produce”.⁴³ Esta medida es cuantificada sobre la base de la diversidad de las exportaciones de un país y de la ubicuidad de estas. La complejidad económica es entendida como una medida relativa. Por ejemplo, se considera a un país más complejo no solo si exporta productos diversos, sino también si estos productos son poco ubicuos (es decir, si existen relativamente pocos países que los exportan). El concepto de complejidad sirve, por tanto, para cuantificar estadísticamente la amplitud (rango o variedad) y la profundidad (sofisticación o rareza) de las capacidades productivas de cada país.⁴⁴

Ventajas productivas de Chile respecto a equipos y sistemas de HV

Un conjunto de datos del Atlas que se presta para analizar el potencial manufacturero de un país respecto a distintos productos es el “Espacio de Productos”, que figura en el gráfico 7 para el caso de Chile. Cada círculo representa una familia de productos definida por los códigos de exportación HS4⁴⁵ (p. ej., oro, automóviles, cebada o cámaras fotográficas), mientras que su tamaño representa el tamaño del mercado global de exportaciones de ese código. Los enlaces entre círculos simbolizan una correlación “fuerte” entre los productos, lo que significa que los países que producen uno de ellos suelen también producir el otro. Si bien los productos, sus enlaces y sus tamaños son invariables (pues están definidos para todo el comercio internacional), a nivel de país se reflejan diferencias según los productos, o círculos, que se “activan” y toman un color. Esto ocurre cuando un país tiene una ventaja comparativa para producir ese bien, frente a otros países.⁴⁶ En el gráfico 7, por ejemplo, puede observarse que Chile tiene una ventaja comparativa en productos como cobre, celulosa, nitratos, alimentos, entre otros. Asimismo, puede observarse que Chile no tiene una ventaja (o simplemente no produce) en la mayor parte del Espacio de Productos.

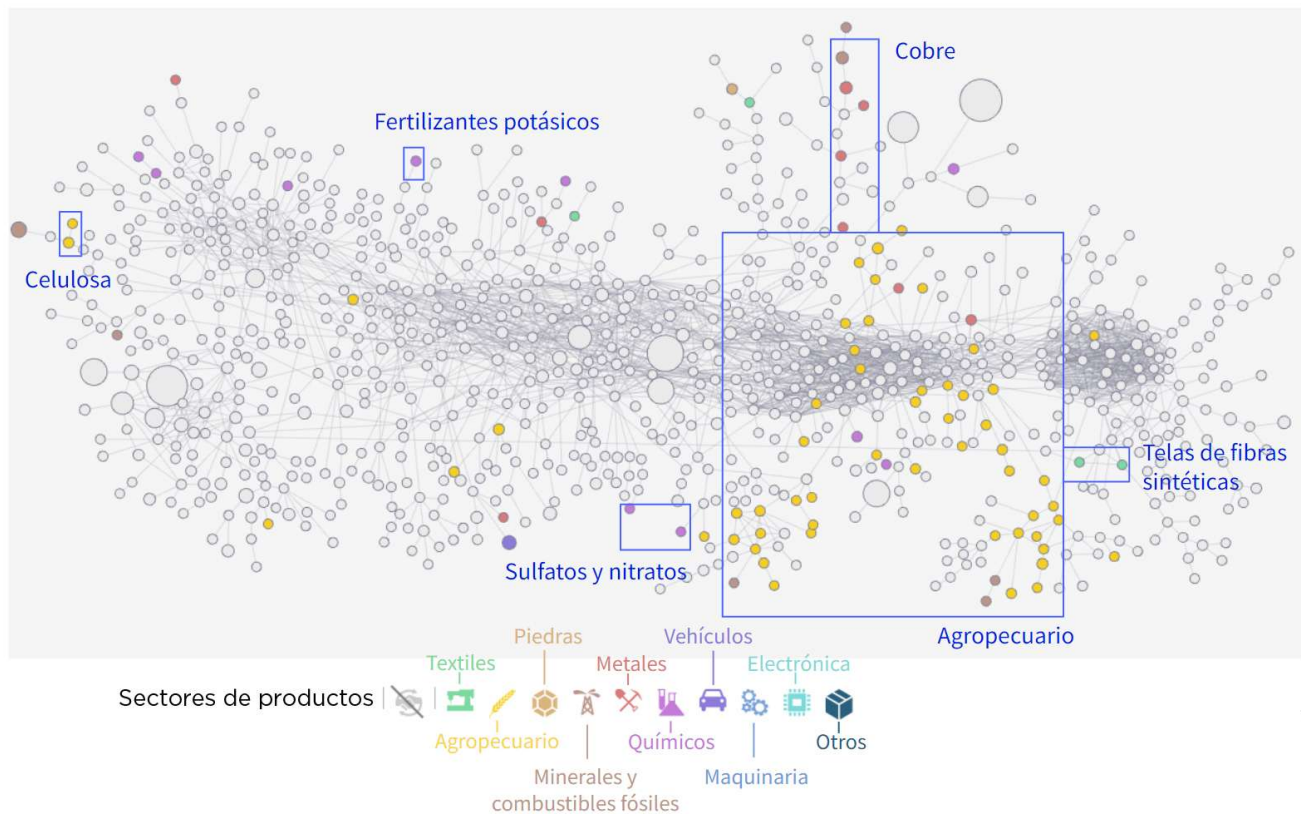
⁴³ <https://atlas.cid.harvard.edu/>.

⁴⁴ Puede consultarse una revisión de la historia y las tendencias de la teoría de la complejidad económica en Hidalgo (2021).

⁴⁵ El sistema de clasificación Harmonized System (HS) es comúnmente utilizado para clasificar bienes exportados por parte de agencias de aduana en todo el mundo. Los bienes comerciados se clasifican en categorías descritas por hasta seis dígitos, mientras que el uso de cuatro o dos dígitos permite agrupar esos productos en categorías más amplias. HS4 se refiere al uso de cuatro dígitos.

⁴⁶ La definición exacta de cuando un país presenta una ventaja comparativa en algún bien consiste en definir si ese bien representa en la canasta de exportaciones de ese país una proporción mayor del valor total que la proporción que ese bien representa respecto del valor total de todo el comercio internacional. Es decir, un país tiene una ventaja comparativa en un producto cuando “exporta más que su justa medida” de ese producto.

Gráfico 7. “Espacio de Productos” de Chile



Fuente: Atlas de Complejidad Económica (el texto es de elaboración propia).

El Atlas tiene limitaciones y fortalezas que deben examinarse si se quiere entender su capacidad de conducir análisis. Su limitación más significativa es que los datos contenidos en la herramienta están limitados a exportaciones de bienes; no representan la producción total en un país de cada bien. Por otra parte, esto conforma una fortaleza, en tanto revela la competitividad relativa de los países en la producción de bienes, puesto que la exportación de un bien en ausencia de competitividad es relativamente más difícil que su producción doméstica. Además, la clasificación de bienes en categorías HS comunes de exportación permite comparar diversos países adecuadamente, aunque por otro lado esto limita al usuario a las definiciones de las categorías, que pueden ser de un nivel más agregado del que se requiere para el análisis particular.

Por otra parte, cabe remarcar que el Espacio de Productos indica correlaciones entre productos y no causalidades; es decir, revela las capacidades de cada país de producir conjuntos de productos simultáneamente, pero no explica secuencias de desarrollo de capacidades para generar ese conjunto. Por último, es preciso notar

que la información utilizada es histórica (entre los años 1995 y 2020, inclusive), por lo que no necesariamente reflejará las relaciones entre productos de cara al futuro. Dicho esto, más allá de sus limitaciones, el Atlas es una herramienta estadística útil para efectuar análisis de oportunidades y desafíos.

Chile no tiene una ventaja comparativa en la mayoría de los equipos y sistemas de la cadena de valor del HV, como puede observarse en el cuadro 4. Un mapeo de un total de 14 de estos a 10 categorías HS4 correspondientes permite observar cuáles son los otros bienes que producen los países que presentan ventajas. Chile tampoco presenta una ventaja comparativa en ninguno de estos productos cercanos a los 10 códigos relacionados a la cadena de valor del HV. En otras palabras, el país no solo no produce en la actualidad esos bienes que son necesarios para la industria del hidrógeno, sino que además tampoco produce aquellos bienes cercanos a estos.

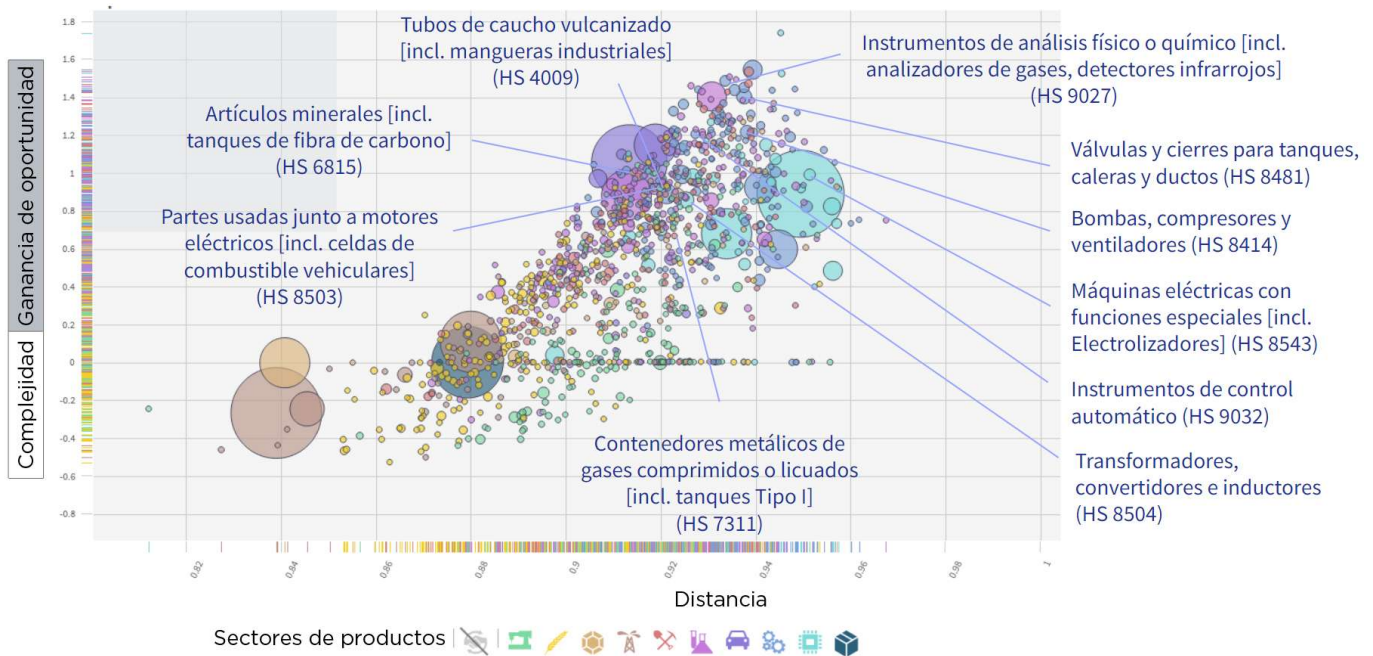
Oportunidades de expansión de las capacidades productivas de Chile

Otra visualización del Atlas que permite ampliar este análisis es el “Espacio de Oportunidades”. Allí se ordenan los productos para los que el país no presenta ventajas (o simplemente no produce) según su “distancia” respecto de la matriz de productos actuales, además de que se muestra la “ganancia de oportunidad” que el país experimentaría si es que comenzase a producir ese bien con ventaja.⁴⁷ En otras palabras, se ordenan los productos según la dificultad relativa del país para comenzar a producirlos y para cada uno se exhibe una medida de la complejidad o sofisticación que aportaría a la matriz productiva del país. La complejidad adicional no solo está relacionada al nuevo producto, sino también a otros productos cercanos a este, que se vuelven más “cercaños” una vez que el país ha comenzado a producir el nuevo producto.

En el gráfico 8 se muestra el Espacio de Oportunidades de Chile, con marcas que apuntan a las 10 categorías HS4 relacionadas con la cadena de suministro de la industria del HV. Puede observarse que la mayoría de estas categorías se ubican en espacios de relativa mayor distancia, aunque también presentan una relativa gran oportunidad de complejidad económica.

⁴⁷ Estos términos se describen a cabalidad y con sus ecuaciones matemáticas en la sección “Glosario del Atlas de Complejidad Económica” (<https://atlas.cid.harvard.edu/>).

Gráfico 8. “Espacio de Oportunidades” de Chile

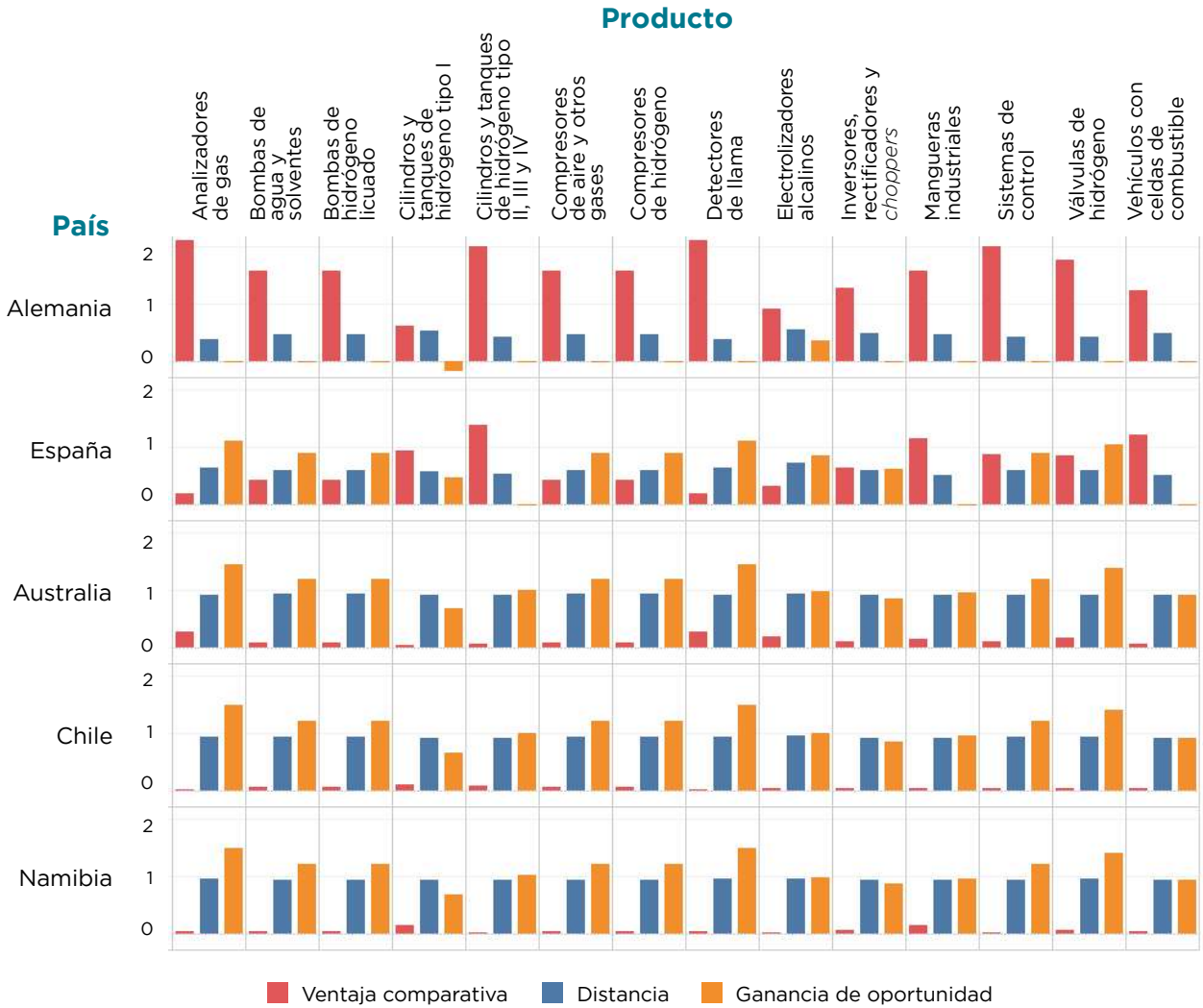


Fuente: Atlas de Complejidad Económica (el texto es de elaboración propia).

Si bien Chile no presenta ventajas ni relativa corta distancia respecto de las 10 categorías de productos examinadas, resulta de interés comparar el resultado con la situación de otros países; en particular, con aquellos que pretenden un desarrollo de la cadena de valor del HV similar, incluidos tanto el consumo doméstico como la exportación. En el gráfico 9 puede observarse una comparación con Alemania, líder tecnológico en este campo; con España, un país industrializado que está desarrollando sus capacidades en hidrógeno, y con Australia y Namibia, países de relativa baja complejidad económica que tienen planes de convertirse en exportadores de HV. En el gráfico 9 también se observa que Alemania es productor y exportador de las 10 categorías examinadas, aunque su cuota de mercado en electrolizadores aún no es dominante. Para esta economía, fabricar más productos relativamente simples en la cadena de valor del hidrógeno podría incluso reducir su complejidad económica, como sería el caso de los tanques de almacenamiento de Tipo I. Además, se observa que España ya goza de ventajas en diversos segmentos (tanques de tipo I, mangueras industriales, sistemas de control, válvulas y componentes de vehículos a celdas de combustible), además de presentar menores distancias a los segmentos

donde todavía no es un productor fuerte.⁴⁸ Sin embargo, un resultado de interés es que Chile no presenta mayor distancia (ni tiene mayor ganancia de oportunidad) a los productos examinados que los países con planes exportadores, como son Namibia y Australia.

Figura 13. Análisis comparativo de complejidad económica en la industria del hidrógeno verde



Fuente: Elaboración propia en base a datos del Atlas de Complejidad Económica.

⁴⁸ Un reflejo de esta menor distancia relativa es el reciente anuncio del primer modelo de compresor de hidrógeno de 1.000 bares, apto para estaciones de recarga de vehículos livianos, desarrollado completamente en España por la empresa española Hiperbaric (Grigoriev *et al.*, 2020). Esta empresa tenía 20 años de experiencia fabricando compresores de gases de alta presión y más de 1.000 unidades instaladas en el mundo al momento de desarrollar este nuevo modelo para hidrógeno apalancando sus capacidades.

Oportunidades y desafíos en materia de conocimiento y capacidades técnicas

Las necesidades para la generación de conocimiento y el fortalecimiento de capacidades humanas en los diferentes eslabones de la cadena de valor del HV deben abordarse con miras a permitir el despliegue eficiente de esta industria. Sin embargo, a pesar del enorme interés reciente en la economía del hidrógeno, son limitadas la literatura y la investigación disponibles públicamente acerca de los grados académicos y técnicos que requerirán las personas que se dediquen a desplegar esta cadena, así como de las habilidades y los conocimientos específicos necesarios para conducirla de manera eficiente, efectiva y segura. En esta sección se describen los hallazgos de algunos de los más detallados estudios efectuados al respecto, y se postulan algunas recomendaciones que deben tenerse en cuenta para su aplicación en Chile.

Probablemente, el estudio más amplio y detallado acerca del impacto en la fuerza laboral que conlleva transitar a una economía del hidrógeno en un país es un informe del Departamento de Energía de Estados Unidos de 2008 (U.S. DOE, 2008). Entre los resultados, se estimó que un uso de 70 Mton/año de hidrógeno en su economía hasta 2050 tendría un incremento neto en la empleabilidad de ese país de 0,37% (675.000 empleos netos). Las ocupaciones consideradas incluyen instaladores, operadores, mantenedores, ingenieros, técnicos de manufactura, ejecutivos/administradores, entrenadores, educadores y financistas/aseguradores.⁴⁹ Si bien este estudio puede presentar una ligera desactualización tecnológica, todavía son aplicables diversos hallazgos, y entre los más interesantes se incluyen:

- En la mayoría de los casos, los cambios requeridos en las habilidades de los trabajadores son graduales y evolutivos. El estudio encuentra que la mayoría de las nuevas capacidades puede suplirse con nuevos trabajadores que entran a la fuerza laboral ya preparados desde sus institutos o universidades, mientras que la mayoría de las capacidades obsoletas coincide con los ritmos de jubilación que son normales en la industria. Esto se explica por la gradualidad en el crecimiento de la industria del hidrógeno, incluso con incentivos públicos. El horizonte de este estudio, al igual que el de múltiples estrategias nacionales de hidrógeno, considera hasta tres décadas de crecimiento del hidrógeno, lo que equivale a aproximadamente un 75% de la carrera de un trabajador.

⁴⁹ En esta sección se utiliza frecuentemente el masculino genérico como sujeto plural de las ocupaciones y puestos de trabajo referenciados, en línea con las guías de la Real Academia Española. Esto de ninguna manera excluye que personas de cualquier sexo y género puedan ejercer las ocupaciones.

- Gran parte de los puestos de trabajo manuales y técnicos de las industrias convencionales pueden reconvertirse a la industria del hidrógeno mediante un entrenamiento *in situ* y clases complementarias, sin que se necesiten nuevos títulos o grados. La mayor excepción a este caso serían los técnicos y mecánicos de la industria manufacturera automotriz, quienes podrían necesitar de mayor reentrenamiento; sin embargo, en el caso de Chile esta conclusión no aplica, pues el país no cuenta con esta industria.
- La composición entre *blue collar jobs* (puestos que involucran trabajo manual, calificado o no calificado) y *white collar jobs* (puestos que no involucran trabajo manual) varía ligeramente en el tiempo. A medida que el hidrógeno aumenta su participación en el mercado energético, se generan relativamente más trabajos netos *white collar* que *blue collar*. Existen diversos factores que intervienen en este resultado, pero uno de los más llamativos es la necesidad de un mayor número relativo de equipos de capacidades sofisticadas que trabajen en el desarrollo de nuevas tecnologías, métodos de manufactura y modelos de negocio (aunque el impacto en términos absolutos no es significativo).

En base a estos y otros hallazgos, el informe propone una serie de recomendaciones al Congreso de los Estados Unidos, algunas de las cuales son aplicables no solo a Chile, sino a toda geografía que planea desplegar esta industria:

- Los programas de entrenamiento (en cualquier nivel) deberían involucrar de forma coordinada a: i) proveedores de hidrógeno; ii) proveedores de tecnologías, y iii) instituciones educacionales. Excluir a cualquiera de estos actores impedirá generar programas efectivos que resuelvan necesidades de capacidades de la industria.
- Algunas capacidades necesarias para la economía del hidrógeno pueden proyectarse con relativa certidumbre, aunque muchas otras aún presentan un muy bajo grado de certidumbre, dado que determinadas tecnologías están todavía en proceso de maduración y no queda claro qué tecnologías serán las dominantes en algunos segmentos de la cadena de valor en cada geografía particular. Por tanto, un enfoque flexible y adaptativo en la capacitación de nuevos trabajadores generará mayor valor para la industria y para el país.
- Se genera valor al incluir conceptos generales sobre el hidrógeno en programas educacionales de todo tipo, incluso a nivel escolar, pues esto permitiría incentivar el interés por la industria en personas que luego podrán integrarse a su fuerza laboral.

- A fin de velar por la equidad intranacional, se requiere vigilar y evaluar el posible impacto de la transición de las industrias al hidrógeno a nivel regional y local. Si bien a nivel país el impacto neto del hidrógeno en la cantidad de empleos puede ser positivo, pueden existir subunidades geográficas que se vean impactadas de manera negativa.⁵⁰ Mantener esta vigilancia permitiría activar acciones de política pública para subsanar los desafíos socioeconómicos emergentes.

De manera complementaria, otro estudio de 2016 de Estados Unidos define los cargos específicos necesarios a lo largo de la cadena de valor del hidrógeno y su potencial sueldo de mercado en ese país (Bezdek, 2019). Algunos hallazgos interesantes incluyen la corroboración del estudio mencionado del Departamento de Energía en tanto una parte significativa, aunque no mayoritaria, de los empleos netos creados se concentrarán en actividades de Diseño, Ventas, Consultoría, Administración, Instrucción y Desarrollo.⁵¹ Además, se presenta un listado de cargos proyectados y sus requisitos educacionales mínimos recomendados. En general, el estudio proyecta que la mayor parte de los puestos que requieren títulos profesionales o universitarios serán ocupados por ingenieros mecánicos, eléctricos y químicos. Por último, el estudio remarca la idea de que las habilidades específicas aún no pueden vislumbrarse con total certidumbre, por lo que una evaluación constante y la coordinación entre actores públicos y privados resultan clave para generar los programas educativos y de entrenamiento necesarios en el tiempo, a medida que vayan surgiendo las necesidades.

Otro estudio de autoría australiana se enfoca en los aspectos de seguridad e interacción con los materiales del hidrógeno como fuentes de requerimientos para nuevo entrenamiento y educación (Skiba, 2020). Una de sus recomendaciones es que toda persona que trabaje en la industria del hidrógeno cuente con un adecuado entrenamiento sobre las propiedades y el comportamiento de este gas, así como sobre los procedimientos de seguridad y control de incidentes y accidentes conexos. El estudio incluye un marco de estándares de competencia divididos en cinco

⁵⁰ Por ejemplo, el informe identifica que ciertas zonas industriales del medio oeste de Estados Unidos (conocido como “Midwest”) podrían ver reducida su demanda de productos automotrices de hierro y acero (blocks de motores, pistones, etc.) a partir de la electrificación (tanto mediante hidrógeno, como baterías) del transporte terrestre. También identifica que zonas de extracción y refinación de petróleo, como la costa del Golfo de México, podrían ver una desaceleración económica en la medida en que el país (y el mundo) se descarbonicen. En ambos casos, el informe remarca las oportunidades de reconversión laboral y de activos que existen.

⁵¹ Una conclusión similar se observa en un estudio español (Worldwide Recruitment Energy, 2022), que encuentra que entre las capacidades más demandadas por esta nueva industria estarían no solo conocimientos de diversas disciplinas de la Ingeniería, sino también el desarrollo de negocios y perfiles multidisciplinarios y flexibles.

unidades que enumeran tanto los conocimientos como las habilidades necesarias para lograr competencia en cada unidad. El marco puede ser usado como una referencia para determinar los contenidos y actividades de nuevos programas de educación general, técnica y universitaria/profesional que se generen.

A nivel nacional, estudios realizados en Chile encuentran que la gran mayoría de los empleos brutos que generaría la industria del HV en el país se concentrarían en la generación y transmisión de la electricidad renovable necesaria como insumo para la industria. La producción de HV, su almacenamiento y su distribución representarían en total menos de 17% de los empleos creados (GIZ e HINICIO Chile, 2020; GIZ e HINICIO Chile, 2021). Esta diferencia con los estudios citados anteriormente se debe a que los estudios realizados en Chile excluyen de su alcance las aplicaciones de hidrógeno y la manufactura de equipos y sistemas en torno a la cadena de suministro. Una similitud conceptual con los estudios citados es el hallazgo de que gran parte de los empleos generados se concentrarán en las áreas de construcción, operación y mantenimiento; es decir, empleos manuales que en su mayor parte requieren de entrenamientos más cortos que la formación universitaria o profesional. Sin embargo, estos estudios no detallan las habilidades y conocimientos que deberán tener los trabajadores que ocupen esos puestos.

En línea con los hallazgos de los estudios citados, las entrevistas realizadas en el marco de este estudio determinaron que la mayoría de las empresas involucradas en la cadena de valor del hidrógeno comienzan su reclutamiento por profesionales altamente calificados en actividades como Administración, Diseño, Ingeniería, Estrategia y Ventas, para luego complementar con un mayor número de trabajadores técnicos y no-calificados una vez que se ponen en marcha la construcción y operación de los proyectos. En general, las empresas con capacidades más sofisticadas demostraron que no solo cuentan con técnicos y profesionales que se han entrenado en conceptos de hidrógeno, sino también con personas con años de experiencia en segmentos de la industria del hidrógeno, quienes demuestran una pericia en el sector que les permite evaluar opciones a la luz de experiencias pasadas, además de que han tendido redes con las que pueden apalancar la resolución de los desafíos técnicos.

Recomendaciones de política para el fortalecimiento de las capacidades técnicas en Chile

En vista de los estudios analizados y las entrevistas realizadas, se proponen las siguientes recomendaciones que deben tenerse en cuenta para diseñar programas y políticas públicas de generación de conocimiento y fortalecimiento de capacidades humanas en los diferentes eslabones de la cadena de valor del HV en Chile:

1. Flexibilidad: Dada la incertidumbre tecnológica y comercial que existe respecto a distintos segmentos de la cadena de valor del hidrógeno, el desarrollo de perfiles de competencias técnicas y profesionales y el desarrollo de programas de capacitación y certificación de competencias debería seguir una lógica flexible y reaccionar en tiempo real o con una ligera anticipación a las necesidades de la industria, en lugar de intentar anticiparlas durante muchos años como han propuesto algunas estrategias (CDT In-Data, 2019). En este último caso, existe un riesgo significativo de generar competencias y transmitir conocimiento que se vuelvan inaplicables o que no sean aplicables por varios años, lo que produce ineficiencia en el uso de los recursos y frustración y bajos retornos a la educación de esas personas. Esto resulta particularmente significativo en los puestos de trabajo manuales y técnicos. Es posible que exista un mayor valor en generar capacidades tempranas en los niveles profesionales y universitarios, que en general se traduciría en nuevos cursos integrados a mallas curriculares existentes y no necesariamente en nuevos títulos o certificaciones profesionales. Dado que gran parte de los proyectos de hidrógeno en desarrollo en Chile y el mundo involucran actores internacionales (en calidad de *sponsors*, financistas, proveedores y desarrolladores) y que la mayor parte de la literatura y los recursos técnicos están disponibles en idiomas distintos al español, quizás la acción más efectiva y eficiente para potenciar la formación de capacidades sea impulsar la formación en idiomas como el inglés.⁵²

2. Practicidad: Además del desarrollo de cursos en carreras universitarias para complementar la formación de profesionales que puedan integrarse a la cadena de valor del hidrógeno –en particular, las Ingenierías–, es necesario promover la adquisición de conocimientos y habilidades en base a experiencias prácticas. Los nuevos profesionales son quienes aportarían una parte importante de las capacidades necesarias a medida que se integren a la fuerza laboral y se retiren los profesionales con capacidades anteriores. Sin embargo, para lograrlo es necesario dotar a los universitarios de experiencias prácticas, pues a diferencia de los modelos angloamericanos de educación (de Estados Unidos y Australia), las carreras universitarias matemático-científicas en Chile suelen contar con tres prácticas como mucho, y de relativa corta duración. Esta brecha podría cubrirse mediante pasantías en la industria local o en el exterior,

⁵² Existen también abundantes recursos técnicos en otros idiomas, como japonés o alemán, aunque por su practicidad para el mundo de los negocios y colaboración técnica internacional, la formación en inglés es más eficiente y efectiva.

ya sea para estudiantes universitarios o para profesionales jóvenes y senior. El Estado podría subsidiar las experiencias a cambio de una retribución de los beneficiarios (por ejemplo, que estos elaboren informes de disponibilidad pública o que realicen una pasantía consecutiva en alguna empresa del Estado). La brecha de experiencias prácticas es particularmente delicada en el caso del hidrógeno, dado que sus características de peligrosidad y su relativa menor experiencia acumulada respecto a otras industrias exigen no solo de capacidades técnicas transversales (por ejemplo, el dimensionamiento de los componentes), sino además de conocimiento, dominio y redes sectoriales (por ejemplo, la probabilidad y causas de incidentes y accidentes más frecuentes y la forma de prevenirlos, mitigarlos y gestionarlos).

3. Difusión: El escalamiento de la industria del HV tendrá impactos significativos no solo a nivel industrial, sino también a nivel de la vida cotidiana de las personas. Integrar módulos educativos sobre hidrógeno en todos los niveles educacionales, incluido el escolar, ayudaría a difundir conocimiento objetivo y capacidades básicas para que la población en general pueda interactuar con la industria, como mínimo para entender de qué se trata. Además, esto permitiría presentar al hidrógeno como una oportunidad de desarrollo laboral que atraerá nuevos trabajadores a su fuerza laboral. En particular, esta nueva industria tendrá impactos relativamente más significativos en algunas regiones, como Antofagasta y Magallanes. En estos casos, es importante que exista un relato común sobre lo que la industria significará para estos territorios, y lo ideal sería que esté coordinado por el Gobierno y alimentado por una multitud de actores. La Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde puede servir como punto de partida para la generación de este relato, aunque debe realizarse una bajada específica respecto de lo que significará para cada región en términos de infraestructura, uso del territorio y oportunidades económicas. Las Mesas y Comisiones Regionales de Hidrógeno Verde que han sido impulsadas por Gobiernos Regionales y Secretarías Regionales Ministeriales en regiones como Antofagasta, Araucanía y Magallanes apuntan a este mismo objetivo y podrían ser profundizadas y ampliadas a otras regiones con el apoyo del Gobierno central.

4. Unificación: El uso de un marco conceptual común para definir los conocimientos y habilidades necesarios a lo largo de la cadena de valor del HV en Chile permitiría simplificar los procesos de educación, entrenamiento y certificación de capacidades. El marco propuesto en Skiba (2020) u

otros⁵³ puede utilizarse como base para la tarea, pudiendo realizarse ajustes a medida que la industria madure y resulte necesario adaptarlo a la realidad del país. Una categorización y lenguaje comunes permitirían facilitar la discusión entre actores y la coordinación público-privada.

5. Coordinación: Todo esfuerzo de generación de nuevo conocimiento, módulos de entrenamiento o certificaciones de competencias debería considerar al menos a los proveedores y manipuladores de hidrógeno, a los proveedores de tecnologías y a las instituciones educacionales. Excluir alguno de estos actores de las definiciones podría generar esfuerzos incompletos, ineficientes o, en el peor de los casos, inaplicables a la industria. Al momento de formular políticas y programas públicos –como los que puedan estar a cargo del Comité Interministerial de Hidrógeno Verde– debe tenerse en consideración la necesidad de actuar coordinadamente con el sector privado. Consultar a las empresas, universidades, centros de investigación y autoridades locales al momento de impulsar iniciativas aumentará la efectividad. Por otro lado, se podrían crear instancias público-privadas permanentes que sirvan de punto de intercambio frecuente de información (por ejemplo, con representantes de la industria y la academia en algún subcomité bajo la órbita del Comité Interministerial).

⁵³ Otros estudios describen algunos perfiles laborales y sus capacidades asociadas, aunque en general no cubren toda la cadena de valor (GIZ y HINICIO Chile, 2020; GIZ y HINICIO Chile, 2021).

3. Recomendaciones de políticas públicas industriales y de innovación

Existen diversas referencias que tratan el tema de recomendaciones de política pública orientadas a acelerar el despliegue de la industria del hidrógeno limpio, tanto a nivel país como a nivel global. Entre otros, esta literatura por lo general se refiere a temas tales como: i) incentivar una transición hacia las energías renovables en las redes eléctricas; ii) cubrir la brecha de costo entre el hidrógeno verde (HV) y los combustibles fósiles; iii) establecer mecanismos de precio para el carbono, y iv) estandarizar la regulación a nivel internacional (IRENA, 2020b; WBCSD, 2021; OCDE, 2022). Sin embargo, las tendencias identificadas y las recomendaciones postuladas en este informe, las cuales se describen a continuación, se refieren específicamente al desafío que conllevan la generación de capacidades tecnológicas y de manufactura y el surgimiento de proveedores y empresas en torno a la cadena de suministro de la industria del HV. En otras palabras, las recomendaciones de esta sección no se refieren a medidas para incentivar la oferta y demanda de hidrógeno, sino a **medidas para generar y capturar valor a nivel local en torno a su industria.**

3.1. TENDENCIAS EN LAS POLÍTICAS INDUSTRIALES Y DE INNOVACIÓN EN TORNO AL HIDRÓGENO VERDE

Las entrevistas realizadas y la literatura de innovación, así como las publicaciones de analistas y expertos, junto con la revisión internacional presentada anteriormente, permiten identificar ciertas **tendencias** en las políticas industriales y de innovación en torno al HV (y otras tecnologías limpias y convencionales):

Tendencia 1: Invertir en la *resolución de desafíos* y no únicamente en el impulso de tecnologías específicas.

Permite mitigar el riesgo de “seleccionar ganadores” erróneamente que luego un nuevo ciclo rápido de innovación (en el mismo país o en otro) deje atrás porque existe una solución más óptima. En general, los programas de innovación de países líderes en tecnología de hidrógeno financian el desarrollo de varias soluciones en el marco del mismo desafío (al contrario del financiamiento de soluciones únicas para diversos desafíos). Sin embargo, se ha identificado que es fundamental impulsar programas de apoyo a investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) en torno a los desafíos específicos de la industria del hidrógeno y no solo programas transversales para tecnologías limpias, dada la necesidad de escalar esta industria en el corto plazo y dada la naturaleza única de sus desafíos (OCDE, 2022). Por ejemplo, Alemania financió tres consorcios en torno a los siguientes desafíos: i) lograr la producción de electrolizadores a gran escala; ii) producir HV y derivados en el sitio de parques eólicos *off shore*, y iii) escalar nuevas tecnologías de transporte con foco en corta y media distancia (S&P Global, 2021).

Tendencia 2: Generar *capacidades en empresas, organizaciones e instituciones* en la misma medida en que se apoya la generación de nuevas tecnologías y productos.

Dado que durante el crecimiento de una nueva industria, como la del HV, los ciclos de innovación ocurrirán rápido y las mejoras en cada generación de soluciones serán más significativas que en una industria madura, diversos programas públicos tienen un fuerte foco en la catalización de empresas y ecosistemas de innovación que sean capaces de mantener su competitividad y capacidad de desarrollo en el tiempo. Por ejemplo, existe evidencia de que China e India implementaron políticas públicas que primero respaldaron el desarrollo de capacidades de manufactura de componentes y equipos de baja complejidad en las industrias solar y eólica, y que luego estos ecosistemas dieron lugar al desarrollo de proveedores de mayor complejidad (Surana *et al.*, 2020; Ladislaw *et al.*, 2021).

Tendencia 3: Considerar la *capacidad de ejecución de fondos públicos* como criterio para su adjudicación a privados.

Si bien la tendencia anterior menciona la necesidad de generar capacidades organizacionales para el desarrollo y la innovación, también resulta fundamental que los programas públicos dirigidos a este fin respalden a empresas e instituciones que tengan alta capacidad de ejecución y un historial probado de éxito en su ámbito. Esto permite que el financiamiento público se destine directamente a cubrir brechas de costo e inversión para comenzar a producir resultados en el menor tiempo posible y así proteger la competitividad de la solución y los desarrolladores, evitando destinar una parte importante del financiamiento y del tiempo de ejecución a la generación de

capacidades básicas. Cabe notar que esta tendencia no excluye el apoyo a nuevas empresas, pues en estos casos es posible examinar la experiencia, las redes y las capacidades de los fundadores y *sponsors* con el mismo fin.

Tendencia 4: Promover adecuadamente un *mayor tamaño y volumen de despliegue de tecnologías*. Navegar la curva de reducción de costos y mejora del rendimiento de nuevas tecnologías energéticas puede requerir tanto del escalamiento del tamaño de las unidades en el caso en que estas tecnologías presentan economías de escala significativas (por ejemplo, plantas de electrólisis) como de una expansión del número de unidades desplegadas en el caso de tecnologías que crecen por difusión (por ejemplo, vehículos con celdas de combustible) (Wilson, 2012). En este último caso, la experimentación y la complementariedad de diversas iniciativas a las que se brinda apoyo simultáneamente permiten el aprendizaje de la industria en base a fracasos tempranos y mitigan los riesgos de respaldar soluciones o equipos específicos mediante diversificación.

Tendencia 5: Priorizar las *necesidades de desarrollo tecnológico y de capacidades de manufactura*. Los gobiernos están respaldando el desarrollo tecnológico y de capacidades de manufactura de manera priorizada en la cadena de valor del hidrógeno limpio. Dado que se requiere impulsar la industria en corto tiempo, que diversas tecnologías no están maduras ni técnica ni comercialmente, y que distintos países tienen capacidades especializadas diferentes, los programas públicos de apoyo suelen enfocarse en las prioridades de desarrollo para las industrias locales de producción, utilización y exportación correspondientes. Por ejemplo, el Reino Unido buscará fortalecer sus capacidades productivas en seis familias de productos,⁵⁴ además del hidrógeno. Si bien se trata de un listado amplio, muestra una priorización para guiar los esfuerzos de desarrollo. La literatura está en línea con esta tendencia: apoyar la I+D+i en un subsector específico antes de que el mercado global haya madurado aumenta la competitividad de fabricantes domésticos y contribuye al crecimiento de la industria local (Nuñez-Jimenes *et al.*, 2022).

3.2. POSICIÓN ESTRATÉGICA DE CHILE

Todo conjunto de políticas públicas debe formularse teniendo en cuenta el contexto del ámbito de aplicación, así como las perspectivas estratégicas respecto a otros actores. En el cuadro 6 se muestra un análisis de fortalezas, oportunidades, debilidades

⁵⁴ Estas son: i) válvulas de presión y cierre; ii) materiales de tuberías (*piping*); iii) testeos de materiales; iv) *stacks* de electrólisis; v) compresores, y vi) celdas de combustible para aplicaciones móviles (Wood y Optimat, 2022).

y amenazas (FODA) elaborado en base a entrevistas realizadas, declaraciones en la prensa de actores de la industria nacional e internacional, y documentos estratégicos encargados por CORFO (CDT In-Data, 2019; Hinicio y PMG, 2022).

Cuadro 6. Análisis FODA del desarrollo de capacidades tecnológicas y de manufactura para la cadena de valor del HV en Chile

Fortalezas

- ✓ Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, NDC y LTS*.
- ✓ Disponibilidad de recursos energéticos renovables a gran escala.
- ✓ Cartera (*pipeline*) existente de inversiones privadas en hidrógeno a toda escala.
- ✓ Mercado energético competitivo y maduro.
- ✓ Infraestructura habilitante existente (puertos, líneas eléctricas, ductos).
- ✓ Capacidades maduras de desalación de agua.
- ✓ Importantes oportunidades de utilización de hidrógeno domésticamente.
- ✓ Existencia de capacidades industriales (minería, *oil&gas*, química).
- ✓ Sofisticado ecosistema universitario.
- ✓ Bajas barreras al comercio internacional.

Oportunidades

- ✓ Los cuellos de botella en cadenas de suministro globales aumentarían el potencial de competitividad de la manufactura doméstica.
- ✓ Existe un desarrollo incipiente de cadenas de suministro en torno al HV (hay menores ventajas competitivas instaladas respecto a otras industrias).
- ✓ Las fortalezas de Chile y su posicionamiento internacional en este sector despiertan el interés de empresas e inversionistas internacionales.

Debilidades

- ✓ Limitada complejidad económica, presupuesto y mercado interno.
- ✓ Asimetrías de información entre reguladores y desarrolladores.
- ✓ Incertidumbre del país y ciclos políticos relativamente cortos.
- ✓ Falta de certificaciones locales y certificadores, tanto para el HV como de los materiales, equipos y servicios de su cadena de suministro.
- ✓ Falta de claridad respecto a las prioridades de desarrollo de proveedores.
- ✓ Falta de proveedores de materias primas.
- ✓ Falta de proveedores de componentes básicos.
- ✓ Falta de capital humano en diversas actividades y segmentos.

Amenazas

- ✓ Los países con gran consumo proyectado de hidrógeno podrían producir gran parte o la totalidad de su demanda, socavando oportunidades de exportación y escala (Estados Unidos, China, India, Unión Europea).
- ✓ Los países de la región podrían desarrollar capacidades exportadoras tecnológicas y de manufactura en torno al HV de forma agresiva y competitiva (Brasil, México, Argentina).

Fuente: elaboración propia en base a entrevistas y a la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde de Chile.
 Nota: * **Contribución Determinada a Nivel Nacional** (NDC, por sus siglas en inglés), documento jurídicamente vinculante bajo el Acuerdo de París. **Estrategia Climática de Largo Plazo** (LTS, por sus siglas en inglés).

Independientemente de las fortalezas y debilidades de Chile para generar las capacidades tecnológicas y de manufactura examinadas en este estudio, las oportunidades y amenazas surgen del hecho de que la economía global está cada vez más interconectada y Chile es una parte integrante. El mercado doméstico para el HV en Chile será relativamente pequeño en comparación con las economías industrializadas y, por tanto, también será relativamente pequeño el mercado de servicios, equipos y sistemas necesarios en su cadena de valor.⁵⁵ Tanto así que las oportunidades de generar capacidades y desarrollar empresas locales con posibilidad de escalar requerirán catalizar áreas de alta competitividad y apalancarse en capacidades y avances locales a fin de aumentar las probabilidades de éxito sostenido en el tiempo. Un ejemplo de lo contrario es el caso relativamente conocido de la pérdida de capacidad manufacturera en la industria solar de Alemania una vez que los subsidios asociados se retiraron y China generó la capacidad de producir equipos y componentes a menor costo, inundando los mercados globales (Ladislaw *et al.*, 2021). Es por eso que las acciones de promoción de una nueva producción doméstica de componentes, equipos o servicios deberían apuntar tanto a soluciones locales que pueden ser provistas de manera competitiva o a nichos en los cuales el país podría generar ventajas competitivas a nivel global para su exportación.⁵⁶

A pesar de que existan fortalezas y oportunidades, toda política pública que se formule en este ámbito debe tener en cuenta la factibilidad presupuestaria y administrativa de la implementación, así como el tiempo necesario de ejecución. Varios países han planteado convertirse en líderes tecnológicos de cara a 2030 y generar un mercado global de hidrógeno para esa fecha. Por lo tanto, las políticas industriales y de innovación que se consideren deben contemplar la factibilidad de obtener resultados concretos y escalables en ese horizonte de tiempo, bajo riesgo de perder competitividad si no se logra. Por otra parte, toda política en el sector del HV debe considerar su cadena de valor completa y no únicamente su producción. En particular, es necesario prestar especial atención a las tecnologías que habilitarán la demanda de HV, que estimularía la capacidad de producción hacia atrás de la cadena.

⁵⁵ Por ejemplo, la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde de Chile explora un escenario en que se consumen 0,5 Mton/año de aquí a 2030 y 4,3 Mton/año de aquí a 2050, mientras que Estados Unidos planea consumir 10 Mton/año y 50 Mton/año, respectivamente (U.S. DOE, 2022b).

⁵⁶ En contraposición a estas guías, están las políticas de requerimiento de contenido local establecidas por países latinoamericanos como Brasil o Argentina en sus industrias de energía renovable. Sin embargo, estas políticas han arrojado resultados variados según el país de implementación y las condiciones de estos mercados no son directamente equiparables a las de Chile. Por ejemplo, si bien Lebdoui (2022) reporta que esta medida ha derivado en una relativamente alta localización doméstica de manufactura de componentes en el sector eólico de Brasil, el mismo artículo resalta que esta nueva actividad industrial apalancó las capacidades existentes del sector de manufactura aeronáutica del país. Chile no presenta esta capacidad ni equivalentes en otras industrias de complejidad similar. Además, existe una diferencia de tamaño de mercado doméstico de un orden de magnitud: mientras Chile cerró 2022 con algo más de 4 GW de capacidad eólica instalada, Brasil lo hizo con más de 23 GW. Estos factores aumentan el riesgo de fracaso de una medida de requerimiento de componentes locales en la industria del HV.

3.3. RECOMENDACIONES

Sobre la base de la información recogida de las referencias consultadas y las entrevistas realizadas, además del análisis propio que se presenta en este estudio, se consolidan las siguientes **ocho recomendaciones de políticas industriales y de innovación**, que definen focos de acción y sugerencias para su ejecución. No obstante, la ruta precisa para implementarlas deberá ser definida por las autoridades e instituciones correspondientes, dado que debe buscarse un equilibrio en cuanto a criterios de eficiencia, equidad, sostenibilidad, adicionalidad, transparencia, simpleza, estabilidad y consistencia (Pérez-Arriaga, 2013).

1. Lo primero es lo primero: Respaldar la expansión de capacidades de empresas en Chile que podrían generar productos en la cadena de suministro del hidrógeno con una necesidad de nuevo *know-how* y maquinaria relativamente menor reduciría el riesgo de cuello de botella de las cadenas de suministro internacionales, encadenaría con capacidades locales para capturar mayor valor y crearía la capacidad de adaptar soluciones técnicas a los proyectos específicos en Chile. Entre estos productos se encuentran: i) mezcladores de gases;⁵⁷ ii) tanques de almacenamiento Tipo I,⁵⁸ y iii) *tube trailers*. Por otra parte, profundizar el apoyo a la generación de servicios de reacondicionamiento de vehículos con celdas de combustible⁵⁹ contribuiría a generar mayor demanda temprana de hidrógeno a bajo costo de inversión.

Riesgo: Las capacidades y los recursos existentes podrían resultar insuficientes para mantener la competitividad de los productores chilenos en estos mercados de manera sostenida, incluso con apoyo inicial. Se requiere un estudio más detallado sobre las posibilidades de competitividad de los productores chilenos para determinar la probabilidad de éxito de esta recomendación.

2. Mente y manos de la región: Fortalecer las capacidades locales de ingeniería, instalación, operación, mantenimiento y certificación de equipos e instalaciones a lo largo de la cadena de valor del hidrógeno apalancaría el talento existente en Chile y resolvería necesidades de la industria local. Desarrollar estos servicios aceleraría la planificación y el despliegue de proyectos, capturaría parte significativa de su

⁵⁷ Estos son sistemas compuestos por tuberías (*piping*), válvulas, controladores, instrumentación, entre otros componentes, que empresas chilenas con experiencia en el manejo de gases podrían diseñar e integrar.

⁵⁸ La industria metalmecánica en Chile manufactura estanques de almacenamiento de combustibles líquidos y gaseosos, pero no cuenta hoy con la maquinaria ni la experiencia adecuadas para producir estanques de hidrógeno. No obstante, su *know-how* puede extrapolarse a esta industria con determinadas capacidades nuevas.

⁵⁹ En particular, equipos industriales móviles livianos (como grúas horquilla) y vehículos de transporte en ruta (como buses y camiones).

valor y posibilitaría las exportaciones futuras de servicios a la región. Chile es uno de los países más avanzados en el desarrollo de la industria del HV en América Latina y enfrenta los mismos desafíos que los países industrializados en cuanto a la integración tecnológica de diferentes equipos y sistemas; generar capacidades tempranas en el ámbito de los servicios técnicos permitiría impulsar la creación no solo de empresas especializadas en diseño, integración e implementación, sino también de productos como *software* y sistemas pre-integrados.

Riesgo: Si no se genera suficiente confianza en la industria respecto de las capacidades de los equipos técnicos y profesionales de Chile, estos perderán su ventaja competitiva frente a equipos de otros países y no podrán aprovecharse las oportunidades descritas. Esto puede mitigarse generando suficiente experiencia en los equipos de técnicos y profesionales de Chile, mediante el apoyo a proyectos,⁶⁰ así como a la transferencia de capacidades con la visita de expertos internacionales que por un tiempo se instalen y formen parte de los equipos locales o con personas que viajen desde Chile a adquirir experiencia durante estancias cortas en el extranjero.

3. Nodo de conexión: Crear o apoyar la creación de un centro de desarrollo tecnológico enfocado en la cadena de valor del HV agruparía a actores industriales y académicos locales e internacionales, lo que permitiría plantear soluciones a las necesidades domésticas y generar integraciones tecnológicas. El éxito de este tipo de centro dependerá no solo del financiamiento que pueda ofrecerse a los proyectos, sino también de la capacidad de ofrecer servicios especializados que faciliten el desarrollo de tecnología. Los servicios deberían incluir capacidades de **testeo** (por ejemplo, bancos de pruebas), **medición** (por ejemplo, laboratorios de muestras) y **certificación** (tanto para equipos y sistemas, como para técnicos y profesionales). La presencia de algunos o todos estos servicios es fundamental para reducir las barreras que enfrentan los desarrolladores de tecnología. La cantidad y la ubicación de los centros deberá definirse de manera estratégica. *A priori*, dos opciones atractivas para evaluar son las regiones de Antofagasta y de Biobío, las cuales presentan ecosistemas de actores ya articulados, múltiples opciones de consumo local de hidrógeno y existencia de proveedores que podrían integrarse a la cadena de valor.⁶¹ Se ha identificado que uno de los factores que promueve el éxito de este tipo de iniciativas es la presencia de un liderazgo fuerte y capaz (Majkut, Nakano y Zacarias,

⁶⁰ Véanse las recomendaciones 5 y 8.

⁶¹ Se podría argumentar que Magallanes, dado su enorme potencial de producción económica de HV, también sería un lugar conveniente para la instalación de uno de estos centros. Sin embargo, las diferencias con las otras ubicaciones propuestas incluyen un número de actores relativamente más bajo (por tanto, menor necesidad de un centro que los articule), menos cantidad de aplicaciones potenciales (por tanto, menor necesidad de desarrollar múltiples tecnologías a lo largo de la cadena de valor) y existencia más reducida de proveedores locales que podrían integrarse a la cadena (dado el relativo menor tamaño de la industria local). Esta priorización obedece a simples parámetros relativos y no absolutos.

2022). Por tanto, resulta clave que se dedique especial atención al establecimiento de una administración que cuente con experiencia, visión y capacidades efectivas de aglutinar actores en estos centros.

Riesgo: La instalación de centros de desarrollo tecnológico puede involucrar tiempos largos de planificación e implementación administrativa y técnica, por lo que se podrían perder las oportunidades de aceleración tecnológica que se pretende impulsar con esta medida. El HV goza de una renovada atención en esta década, por lo que cualquier esfuerzo público que pretenda tener un impacto deberá ejecutarse en un horizonte relativamente corto; caso contrario, los esfuerzos habrán sido en vano. Este riesgo podría mitigarse con procesos de concurso y adjudicación reducidos, buscando otorgar el financiamiento comprometido de la manera más ágil posible según la regulación vigente y priorizando la adjudicación a actores que tengan demostrada experiencia con proyectos de alta complejidad en vinculación con la industria y los mercados tecnológicos.

4. Masa crítica: Apoyar el despliegue temprano y amplio de múltiples experimentos comerciales de soluciones tecnológicas que se expandan por difusión diversificará el riesgo de fallas (tecnológicas y comerciales) y acelerará el aprendizaje de la industria completa. En particular, se prestan para esta diversificación las tecnologías como usos móviles (vehículos de todo tipo y estaciones de recarga vehicular) y los usos industriales livianos (como grúas horquilla o pequeñas calderas). La puesta en marcha de un gran número de proyectos de pequeña escala podría lograrse a relativo bajo costo, a la vez que generaría la emergencia de cadenas de proveedores, permitiría descubrir precios y brechas de innovación específicas del mercado y activaría el fenómeno de difusión tecnológica por el que se rige la expansión de ciertas tecnologías. Por otra parte, el despliegue de estos experimentos acelerará el desarrollo de regulación y sistemas de certificación y la emergencia de servicios conexos. El apoyo a este despliegue puede tomar diversas formas, dependiendo de los recursos disponibles. Las alternativas que podrían implementarse son, entre otras: i) subsidios a la inversión o a la operación (para permitir que los privados cubran las brechas de costo respecto de soluciones fósiles actuales); ii) beneficios tributarios al recambio tecnológico; iii) provisión de infraestructura de acceso público (por ejemplo, estaciones de recarga vehicular de hidrógeno); iv) asistencia técnica,⁶² y v) compra de equipos y sistemas de HV por parte de instituciones públicas (*public procurement*).

Riesgo: El número de proyectos desplegados podría resultar insuficiente para activar el fenómeno de difusión tecnológica deseado y podría no generar los aprendizajes buscados con la medida. Este riesgo podría mitigarse con mejores estimaciones del

⁶² Por ejemplo, ampliando o profundizando el programa Aceleradora de Hidrógeno Verde de la Agencia de Sostenibilidad Energética (<https://www.agenciase.org/aceleradora-h2v/>).

apoyo público que requerirían actores privados para desplegar experimentos de escala comercial, en vez de proyectos piloto individuales. También, con un enfoque flexible: en la medida en que los efectos buscados no se observen con la frecuencia o intensidad deseadas, el apoyo podría incrementarse, o reducirse en el caso de que los efectos buscados se observen en niveles deseados.

5. La gran apuesta: Atraer compañías internacionales para que instalen capacidad manufacturera más sofisticada a largo plazo en Chile generaría –en condiciones adecuadas– polos de capacidades que capturarían más valor de la cadena del HV y habilitarían a su vez nuevos productos y servicios en la cadena. Se podría movilizar o incentivar a estos actores para que generen *joint ventures* con empresas locales con el objetivo de fomentar la transferencia de capacidades (lo que puede ser incluso un requisito al que determinado apoyo público podría estar condicionado). En particular, dos actividades en las que se podría invertir para este objetivo son: i) la integración de *stacks* de electrólisis en sistemas de electrólisis, en particular de la tecnología PEM (aunque sin excluir otras opciones),⁶³ y ii) la fabricación de rectificadores e inversores.⁶⁴ Generar capacidades para producir estos equipos a nivel local resolvería cuellos de botella en las cadenas de suministro internacionales en las próximas décadas y aprovecharía el relativo “aislamiento” en el Espacio de Productos, en comparación con otros equipos y sistemas más complejos y, por tanto, más difíciles de comenzar a producir. En la literatura de política industrial se han identificado diversas maneras de atraer este tipo de actores y capacidades. En la actualidad, algunas de las más discutidas en la industria y la literatura con miras a generar inversión en manufactura e innovación en nuevos sectores son: i) incentivos directos (ya sea mediante subsidios a la inversión o beneficios tributarios); ii) requerimientos de contenido local (en general, como condición para participar de licitaciones reguladas o para recibir algún tipo de apoyo público), y iii) la definición de polos de desarrollo industrial (para los que el Estado proveería cierta infraestructura

⁶³ En la sección 1 se describe la diferencia entre estos niveles de integración de componentes. Las capacidades en Chile se observan como lejanas respecto a la potencial producción de *stacks* de electrólisis de cualquier tipo, pero las capacidades y cadenas de proveedores internacionales existentes permitirían su integración en *sistemas* con relativamente menor esfuerzo. El caso de India y su industria solar fotovoltaica siguió la misma ruta: inició su desarrollo con el ensamblado de celdas fotovoltaicas importadas en paneles y estructuras para luego generar capacidades de producción de celdas (Ladislav *et al.*, 2021). Se sugiere iniciar con la tecnología PEM por su: i) alta modularidad; (ii) capacidad de integrarse con sistemas de generación de energía renovable variable, y iii) relativo alto interés de parte de inversionistas, desarrolladores tecnológicos, productores potenciales de hidrógeno verde y fabricantes.

⁶⁴ En el anexo 1 se observa que, relativos a su potencial tamaño de mercado en la industria del HV, estos equipos están correlacionados con relativamente menos productos y de menor complejidad que otros equipos en la cadena de valor del hidrógeno. Por lo tanto, ofrecen una más alta relación valor/dificultad que otros productos identificados. El desafío principal que debe analizarse antes de tomar la decisión de respaldar este desarrollo es determinar si Chile podría acceder a un mercado lo suficientemente grande (potencialmente, América Latina) como para justificar inversiones en capacidad de manufactura o integración. Hoy en día, los mayores exportadores de estos equipos son China, Alemania, Estados Unidos y Japón.

pública, aceleraría la obtención de permisos y potencialmente incentivaría con beneficios tributarios) (Lebdoui, 2022). Cada medida contempla diversos costos y riesgos para los diferentes actores.

Riesgo: La falta de demanda segura y a largo plazo para estos equipos y sistemas, así como la ausencia de proveedores de componentes y de capacidades técnicas domésticas, podría hacer que el esfuerzo de atracción de empresas internacionales sea en vano. Este riesgo podría mitigarse con políticas que ofrezcan mayor certidumbre acerca de la demanda de HV y de estos equipos en el largo plazo, así como con un estudio más detallado acerca de otras condiciones necesarias y suficientes para instalar estas capacidades productivas en Chile y acerca de los mecanismos para establecerlas.

6. Chile, país minero: Respaldar el desarrollo de tecnologías que aún no están maduras ni tecnológica ni comercialmente –pero que tanto habilitarían una demanda significativa de HV pues se encadenarían con la industria minera del país– permitiría generar y capturar valor aprovechando las capacidades que existen en Chile. En particular, facilitar la maduración tecnológica y la implementación comercial de las tecnologías de acero verde y de cobre verde apalancaría esfuerzos existentes⁶⁵ y no solo habilitaría nuevas fuentes de demanda de HV, sino que además sumaría valor agregado a la producción y exportación actual de estos metales.⁶⁶ Se trata de esfuerzos de largo plazo: la implementación de estas tecnologías a gran escala probablemente no vaya a observarse hasta dentro de al menos una década. En el caso del acero verde, el apoyo debería enfocarse en impulsar la implementación de tecnologías existentes a escala industrial,⁶⁷ lo que puede lograrse a través de subsidios, beneficios tributarios, provisión de infraestructura clave (por ejemplo, muelles o

⁶⁵ La Siderúrgica Huachipato se encuentra preparando un piloto de acero verde, cuyo segmento de producción fue adjudicatario de fondos CORFO (https://www.capacero.cl/cap_acero/fabricar-aceros-de-manera-sostenible-el-proyecto-de-cap-para-usar/2022-01-06/122230.html). Esto se da en el marco de los esfuerzos de la empresa por producir acero verde de cara a 2030. Por otra parte, la Universidad de Concepción planifica pilotar una nueva tecnología de cobre verde desarrollada a nivel local (<https://noticias.udec.cl/udec-corfo-y-codelco-avanzan-en-piloto-para-crear-cobre-con-cero-emisiones-y-residuos/>).

⁶⁶ Este valor agregado puede capturarse de diversas maneras. Una de ellas es exportar estos metales verdes o bajos en carbono a la Unión Europea, la cual está en proceso de establecer un “mecanismo de ajuste de carbono en frontera”, que obligará a pagar por las emisiones a lo largo de toda su cadena de producción y suministro a las importaciones industriales a esa zona económica. El mecanismo comenzaría a generar un “premio verde” en 2026 ó 2027, para alcanzar su mayor magnitud en 2032 ó 2035, dependiendo de las reglas definitivas que se adopten.

⁶⁷ Esto se observa actualmente en la Unión Europea, donde proyectos que incluyen HV como insumo –como los que figuran a continuación– están siendo desarrollados para dar impulso a un mercado del acero verde: i) SSAB implementará la tecnología HYBRIT en su fábrica de Raahe (Finlandia); ii) H2 Green Steel construirá la primera planta a gran escala en Suecia y entrará en operaciones en 2025; iii) Air Liquide y ArcelorMittal producirán acero verde en Dunquerque (Francia) en 2030, y iv) Tenaris, Edison y Snam están impulsando una iniciativa para producir acero verde en la planta de Dalmine (Italia).

puertos) o facilitación de permisos. En el caso del cobre verde, su tecnología aún necesita demostrarse y pilotarse antes de poder escalar al nivel industrial y comercial. Por tanto, el apoyo debería enfocarse en entregar capital de riesgo, subsidios o servicios de respaldo a través de empresas públicas (por ejemplo, instalaciones de pruebas), además de deuda subordinada o concesional una vez que la tecnología esté demostrada, con miras a acelerar su despliegue.

Riesgo: La existencia de relativamente pocos actores locales con la capacidad de abordar estos desafíos de desarrollo tecnológico impediría la diversificación de riesgos. Esto podría mitigarse condicionando el apoyo público a la integración de actores internacionales con experiencia y capacidad probada de ejecución de proyectos de innovación similares en los consorcios o asociaciones que se formen para abordar los desafíos. La integración con actores internacionales también facilitaría la posterior exportación de la tecnología y los servicios asociados, apalancando redes y operaciones en otros países de la región y del mundo.

7. Un avance coordinado: Definir las familias de tecnologías (tanto maduras como en desarrollo) que serán necesarias y deseables para el despliegue efectivo y eficiente de la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde enviaría señales de mercado a inversionistas, proveedores y desarrolladores tecnológicos especializados en cada segmento de la cadena de valor. Las señales no serían necesariamente vinculantes ni excluyentes, pero servirían para atraer actores internacionales relevantes de esos segmentos y para que los actores de la industria nacional se alineen para avanzar en direcciones comunes. La definición de conjuntos de tecnologías podría efectuarse como un apéndice de la Estrategia Nacional (por ejemplo, bajo el nombre de Hoja de Ruta Tecnológica) o como un documento público independiente, que se actualice periódicamente.

Riesgo: La sobredefinición de soluciones tecnológicas podría crear un *lock-in* tecnológico. Este riesgo es mitigable con una adecuada clasificación de las tecnologías en categorías que reflejen tanto la aplicabilidad al contexto local como la dominancia de esas soluciones en sus segmentos de la cadena de suministro. Un ejemplo de categorización incluiría tecnologías: i) “necesarias” (p. ej., compresores mecánicos de hidrógeno, que son la solución madura y dominante para presurizar hidrógeno gaseoso); ii) “potenciales” (p. ej., sistemas de distribución de hidrógeno licuado, que el mercado podría definir como la solución más eficiente en ciertas configuraciones de proyecto), y iii) “de baja aplicabilidad” (p. ej., almacenamiento en cavernas de sal, que no existen en escala suficiente para mantener una industria de almacenamiento de hidrógeno (Silva Ríos, 2016).

8. Ojos abiertos: Generar un observatorio tecnológico con capacidades efectivas aseguraría la permanencia de la competitividad de producción y del uso del HV en Chile, permitiendo además reservar los recursos públicos para desarrollar tecnologías y capacidades productivas que efectivamente tengan proyección de crecimiento y se encuentren cercanas a las posibilidades actuales del país. En particular, esta entidad debería prestar especial atención a los desarrollos en los siguientes ámbitos: i) celdas de electrólisis y combustible; ii) reciclaje de celdas y *stacks* de electrólisis y combustible, y iii) sistemas de almacenamiento a gran escala (especialmente sistemas de hidrógeno licuado), con el objetivo de conectar y movilizar actores locales, tales como centros de desarrollo o productores, para que adopten estas nuevas tecnologías o se asocien con sus proveedores. El observatorio podría estar ubicado dentro de alguna institución pública existente (por ejemplo, en el centro de desarrollo tecnológico propuesto en la medida 5), podría concesionarse a algún actor privado o consorcio o, en su defecto, podría crearse una nueva organización ligera e independiente. Dependiendo de la naturaleza institucional del observatorio, este podría adoptar la representación de Chile (o, al menos, acompañar a las instituciones representantes en calidad de observadores) en foros y redes internacionales tecnológicas de hidrógeno, como la Clean Hydrogen Mission de Mission Innovation (MI), la International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy (IPHE) o el Technology Collaboration Programme (TCP) de hidrógeno de la Agencia Internacional de Energía.

Riesgo: Una entidad sin capacidades efectivas de movilizar e integrar actores y de transferir conocimiento a la industria reportaría un impacto imperceptible en el ecosistema de hidrógeno. En la actualidad, la industria global recibe un altísimo interés y existen múltiples fuentes públicas y privadas de información en distintos ámbitos. Para mitigar el riesgo de redundancia en la generación de información, una entidad de vigilancia tecnológica efectiva debería estar dotada, entre otras cosas, de capacidades para impulsar misiones tecnológicas (desde y hacia el extranjero); organizar talleres técnicos especializados (donde, por ejemplo, se discutan soluciones para los desafíos específicos en la cadena de suministro), y ofrecer asesoramiento para la formulación de toda política pública en el ámbito del HV. Así, la entidad podría generar valor para reducir las brechas de información y redes.

Referencias

Anglo American. 2021. Anglo American genera la primera molécula de Hidrógeno Verde para vehículos cero carbono en Chile. Comunicado de Prensa. Disponible en: <https://chile.angloamerican.com/media/press-releases/pr-2021/2021-08-23.aspx>.

Ansari, D., J. Grinschgl y J. Maria Pepe. 2022. Electrolysers for the Hydrogen Revolution: Challenges, dependencies, and solutions. German Institute for International and Security Affairs. SWP.

Asahi Kasei Corp. 2022. Asahi Kasei starts construction of alkaline water electrolysis pilot test plant for hydrogen production. Comunicado de Prensa. Disponible en: <https://www.asahi-kasei.com/news/2022/e221107.html>.

Australian Renewable Energy Agency (ARENA). 2022. ARENA-Funded Hydrogen Projects and Reports.

Banco Mundial. 2023. GDP (current USD) from The World Bank: Data. Disponible en: <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD>.

Bezdek, R. 2019. The hydrogen economy and jobs of the future. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*. 4:1.

Bilbao, D. C. 2021. Valorization of the waste heat given off in a system alkaline electrolyzer-photovoltaic array to improve hydrogen production performance: Case study, Antofagasta, Chile. *International Journal of Hydrogen Energy*. 46(61): 31108-31121. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.016>.

Bloom Energy. 2022. Bloom Electrolyzer Data Sheet. Disponible en: https://www.bloomenergy.com/wp-content/uploads/Data-Sheet_Bloom-Electrolyzer-10-MW_UPDATED-6.24.22.pdf.

Carmo, M., D. Fritz, J. Mergel y D. Stolten. 2013. A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. Págs. 4901-4934.

CDT In-Data. 2019. Construcción de una estrategia para el desarrollo del mercado de hidrógeno. Preparado para el Programa Estratégico Nacional Industria Solar de CORFO.

Centro de Energía UC. 2020. Proposición de Estrategia Regulatoria del Hidrógeno para Chile. Preparado para la GIZ.

CID Harvard. 2023. Atlas of Economic Complexity: Country & Product Complexity Rankings. Disponible en: <https://atlas.cid.harvard.edu/rankings>.

Cochilco. 2016. Situación actual del mercado de tierras raras y su potencial en Chile. Comisión Chilena del Cobre.

Commonwealth of Australia. 2021. State of Hydrogen. Department of Industry, Science, Energy and Resources.

Cooper, J., L. Dubey, S. Bakkaloglu y A. Hawkes. 2022. Hydrogen emissions from the hydrogen value chain-emissions profile and impact to global warming. *Science of the Total Environment*. Vol. 830.

CORFO. 2022. Corfo firma acuerdos para financiar los primeros proyectos de Hidrógeno Verde a escala industrial en Chile. Comunicado de Prensa. Disponible en: https://www.corfo.cl/sites/cpp/sala_de_prensa/nacional/26_05_2022_firma_hidrogeno_verde;jsessionid=eDsD7-QDwKp-b5YN9r6oGUh5f8-910IKZss-SQ-J-uBJiLtVfifd!114663455!-83799172.

Diario Concepción. 2022. Rechazo transversal en Penco generó anuncio de empresa que insiste en concretar proyecto de “Tierras Raras”. Comunicado de Prensa. Disponible en: <https://www.diarioconcepcion.cl/economia/2022/10/30/rechazo-transversal-en-penco-genero-anuncio-de-empresa-que-insiste-en-concretar-proyecto-de-tierras-raras.html>.

EPO e IRENA. 2022. Patent insight report. Innovation trends in electrolysers for hydrogen production. European Patent Office. Vienna.

FMI. 2023. IMF DATA Access to Macroeconomic & Financial Data: Government Finance Statistics (GFS). Disponible en: <https://data.imf.org/?sk=89418059-d5c0-4330-8c41-dbc2d8f90f46&slid=1437430552197>.

FuelCell Energy. 2022. FuelCell Energy Announces Solid Oxide Electrolysis and Fuel Cell Platform to Improve Control and Flexibility of Energy Investments. Comunicado de Prensa. Disponible en: <https://www.globenewswire.com/news-release/2022/12/06/2568223/0/en/FuelCell-Energy-Announces-Solid-Oxide-Electrolysis-and-Fuel-Cell-Platform-to-Improve-Control-and-Flexibility-of-Energy-Investments.html>.

Gallardo, F. I., A. M. Ferrario, M. Lamagna et al. 2021. A Techno-Economic Analysis of solar hydrogen production by electrolysis in the north of Chile and the case of exportation from Atacama Desert to Japan. *International Journal of Hydrogen Energy*. 46(26): 13709-13728. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.050>.

GIZ, ARIEMA Energía y Medioambiente S.I. y TCI Gecomp SpA. 2021a. Estudio de prefactibilidad técnica y económica de la producción de hidrógeno verde mediante electrólisis para la entidad Espinos S. A. Disponible en: <https://4echile.cl/wp-content/uploads/2021/09/Produccion-y-costos-H2-Espinos.pdf>.

———. 2021b. Estudio de prefactibilidad técnica y económica de la producción de hidrógeno verde mediante electrólisis para la entidad GNA. Disponible en: <https://4echile.cl/wp-content/uploads/2021/09/Produccion-y-costos-H2-GNA.pdf>.

GIZ et al., 2020. Identificación de aspectos ambientales, sectoriales y territoriales para el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde en toda su cadena de valor. Disponible en: <https://4echile.cl/wp-content/uploads/2021/09/Aspectos-ambientales-H2.pdf>.

GIZ e Inicio Chile. 2020. Cuantificación del encadenamiento industrial y laboral para el desarrollo del hidrógeno en Chile. Disponible en: <https://4echile.cl/wp-content/uploads/2021/09/Encadenamiento-Reporte-Final.pdf>.

———. 2021. Cuantificación del encadenamiento laboral para el desarrollo del hidrógeno en Chile bajo un escenario de exportación. Disponible en: <https://4echile.cl/wp-content/uploads/2021/09/Estudio-empleos-H2-verde-con-exportacion.pdf>.

Gobierno de España. 2021. Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia. Componente 9: Hoja de ruta del hidrógeno renovable y su integración sectorial. Disponible en: <https://www.lamoncloa.gob.es/temas/fondos-recuperacion/Documents/16062021-Componente9.pdf>.

Grigoriev, S., V. Fateev, D. Bessarabov et al. 2020. Current status, research trends, and challenges in water electrolysis science and technology. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 45. Págs. 26036-26058.

H2 LAC. 2022. Planta Piloto Móvil de H2V permitirá cuantificar el potencial de generación de la región de Antofagasta. Comunicado de Prensa. Disponible en: <https://h2lac.org/noticias/planta-piloto-movil-de-h2v-permitira-cuantificar-el-potencial-de-generacion-de-la-region-de-antofagasta/>.

Hauch, A., R. Küngas, P. Blennow et al. 2020. Recent advances in solid oxide cell technology for electrolysis. *Science*. Vol. 370. Nro. 6513.

Heritage Foundation. 2023. 2023 Index of Economic Freedom: Country Rankings. Disponible en: <https://www.heritage.org/index/ranking>.

Hidalgo, C. 2021. Economic complexity theory and applications. *Nature Reviews Physics*. 3: 92-113.

Hinicio y PMG. 2022. Hoja de Ruta para la Implementación de Hidrógeno Verde en la Región de Magallanes. Informe preparado para el Programa Transforma Regional Patagonia Austral de CORFO.

Hodges, A., A. Hoang, G. Tsekouras et al. 2022. A high-performance capillary-fed electrolysis cell promises more cost-competitive renewable hydrogen. *Nature Communications*. Vol. 13. Nro. 1304.

Hydrogen Council y McKinsey & Company. 2022. Hydrogen Insights 2022: An updated perspective on hydrogen market development and actions required to unlock hydrogen at scale. Disponible en: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2022/09/Hydrogen-Insights-2022-2.pdf>.

International Energy Agency (IEA). 2022. Securing Clean Energy Technology Supply Chains. Disponible en: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/0fe16228-521a-43d9-8da6-bbf08cc9f2b4/SecuringCleanEnergyTechnologySupplyChains.pdf>.

International Renewable Energy Agency (IRENA). 2020a. Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal. Abu Dhabi. Disponible en: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf.

———. 2020b. Green hydrogen: A guide to policy making. Abu Dhabi. Disponible en: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_hydrogen_policy_2020.pdf.

Ito, H., N. Miyazaki, S. Sugiyama et al. 2018. Investigations on electrode configurations for anion exchange membrane electrolysis. *Journal of Applied Electrochemistry*. Vol. 48. Nro. 3.

KBR. 2020. Study of Hydrogen Imports and Downstream Applications for Singapore. Preparado para la National Climate Change Secretariat, Oficina del Primer Ministro. Singapore.

Kumar, S. y H. Lim. 2022. An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. *Energy Reports*. 8: 13793-13813.

Ladislaw, S., E. Zindler, J. Nakano et al. 2021. Industrial Policy, Trade, and Clean Energy Supply Chains. A Report of the CSIS Energy Security and Climate Change Program & BloombergNEF.

Larsen, J., B. King, H. Kolus et al. 2022. Turning Point for US Climate Progress: Assessing the Climate and Clean Energy Provisions in the Inflation Reduction Act. Rhodium Group.

Lebdioui, A. 2022. Latin American Trade in the Age of Climate Change: Impact, Opportunities, and Policy Options. Canning House Research Forum.

Majkut, J., J. Nakano y M. Zacarias. 2022. Making Hydrogen Hubs a Success. CSIS: Center for Strategic & International Studies.

Nippon Shokubai. 2020. Nippon Shokubai Developed New Separator for Alkaline Water Electrolysis Which Supports the Conversion of Renewable Energy to “Green Hydrogen”. Comunicado de Prensa. Disponible en:
<https://www.shokubai.co.jp/en/news/202002177245/>.

Nuñez-Jimenes, A., C. Knoeri, J. Hoppmann et al. 2022. Beyond innovation and deployment: Modeling the impact of technology-push and demand-pull policies in Germany's solar policy mix. *Research Policy*. Vol. 51.

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). 2022. Innovation and Industrial Policies for Green Hydrogen. OECD Science, Technology and Industry Policy Papers. Disponible en:
<https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/f0bb5d8c-en.pdf?expires=1677169584&id=id&accname=guest&checksum=124D1035488B125383CC7E4199174077>.

Patonia, A. y R. Poudineh. 2022. Cost-competitive green hydrogen: How to lower the cost of electrolyzers? Oxford Institute for Energy Studies. Disponible en:
<https://a9w7k6q9.stackpathcdn.com/wpcms/wp-content/uploads/2022/01/Cost-competitive-green-hydrogen-how-to-lower-the-cost-of-electrolysers-EL47.pdf>.

Pérez-Arriaga, I. J. 2013. Regulation of the Power Sector. Springer.

Revista Minería Chilena. 2022. Consorcio Hydra empieza pruebas del prototipo de hidrógeno verde para vehículos mineros. Comunicado de Prensa. Disponible en: <https://www.mch.cl/2022/09/13/consorcio-hydra-empieza-pruebas-del-prototipo-de-hidrogeno-verde-para-vehiculos-mineros/#>.

S&P Global. 2021. Germany to spend EUR 700M on 3 hydrogen research projects. Comunicado de Prensa. Disponible en: <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/germany-to-spend-8364-700m-on-3-hydrogen-research-projects-62113936>.

Satyapal, S. 2022. U.S. Department of Energy Hydrogen Activities and Hydrogen Shot Overview. U.S. Department of Energy.

Servicio de Evaluación Ambiental. 2016. Resuelve consulta de pertinencia de ingreso al SEIA del proyecto que indica. RE No 0408/2016. Antofagasta.

Servicio Nacional de Geología y Minería. 2022. Anuario de la Minería de Chile 2021. Disponible en: https://www.sernageomin.cl/pdf/Anuario_de_la_mineria_de_chile_2021_v_30062022.pdf.

Silva Ríos, C. 2016. Sistemas de almacenamiento de energía mediante aire comprimido dentro de formaciones geológicas en Chile. Repositorio Académico de la Universidad de Chile.

Skiba, R. 2020. Competency Standards for Emerging Hydrogen Related Activities. Open Journal of Safety Science and Technology. 10: 42-52.

Surana, K., C. Doblinger, L. Díaz Anadon et al. 2020. Effects of technology complexity on the emergence and evolution of wind industry manufacturing locations along global value chains. *Nature Energy*. 5: 811-821.

Townley, B., A. Díaz y R. Luca. 2017. Estado del arte y potenciales recursos Co y Mn en Chile. Advanced Mining Technology Center (AMTC). Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

TÜV SÜD. 2022. Explora la cadena de valor del hidrógeno. Disponible en: <https://www.tuvsud.com/es-es/temas/hidrogeno/cadena-valor-hidrogeno>.

U.S. DOE. 2008. Effects of a Transition to a Hydrogen Economy on Employment in the United States. Report to Congress.

———. 2019. FY 19 H2@Scale Funding Opportunity Announcement. Disponible en: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2019/08/f65/fcto-fy19-h2-at-scale-foa-selections.pdf>.

———. 2020. H2@Scale New Markets Funding Opportunity Announcement (FOA). Disponible en: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/07/f76/hfto-h2-at-scale-new-markets-foa-selections-for-release.pdf>.

———. 2022a. Water Electrolyzers and Fuel Cells Supply Chain: Supply Chain Deep Dive Assessment. U.S. Department of Energy Response to Executive Order 14017, America's Supply Chains.

———. 2022b. DOE National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap. Disponible en: <https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/clean-hydrogen-strategy-roadmap.pdf>.

World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). 2021. Policy Recommendations to Accelerate Hydrogen Deployment for a 1.5°C Scenario. Disponible en: <https://www.wbcsd.org/contentwbc/download/13039/191669/1>.

Wilson, C. 2012. Up-scaling, formative phases, and learning in the historical diffusion of energy technologies. *Energy Policy*. 50: 81-94.

Wood y Optimat. 2022. Supply Chains to Support a Hydrogen Economy. Final Report for the Department for Business, Energy & Industrial Strategy (BEIS). United Kingdom.

Worldwide Recruitment Energy. 2022. Contexto laboral y previsiones de crecimiento del hidrógeno verde. Disponible en: <https://energy.worldwiderecruitment.org/wp-content/uploads/2022/06/Contexto-Laboral-y-Previsiones-de-Crecimiento-del-Hidrogeno-Verde-2022.pdf>.

Yue, M., H. Lambert, E. Pahon et al. 2021. Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 146.

Anexo: Productos de la cadena de suministro del hidrógeno verde no producidos en Chile y su clasificación HS4

Producto	Código HS4	Descripción productos
Mangueras industriales	4009	Enlace
Cilindros y tanques de hidrógeno Tipo IV	6815	Enlace
Cilindros y tanques de hidrógeno Tipo I, II, III	7311	Enlace
Compresores de hidrógeno		
Bombas de hidrógeno licuado	8414	Enlace
Bombas de agua y solventes		
Compresores de aire y otros gases		
Válvulas de hidrógeno	8481	Enlace
Vehículos con celdas de combustible	8503	Enlace
Inversores, rectificadores y <i>choppers</i>	8504	Enlace
Electrolizadores alcalinos	8543	Enlace
Analizadores de gas	9027	Enlace
Detectores de llama		
Sistemas de control	9032	Enlace

