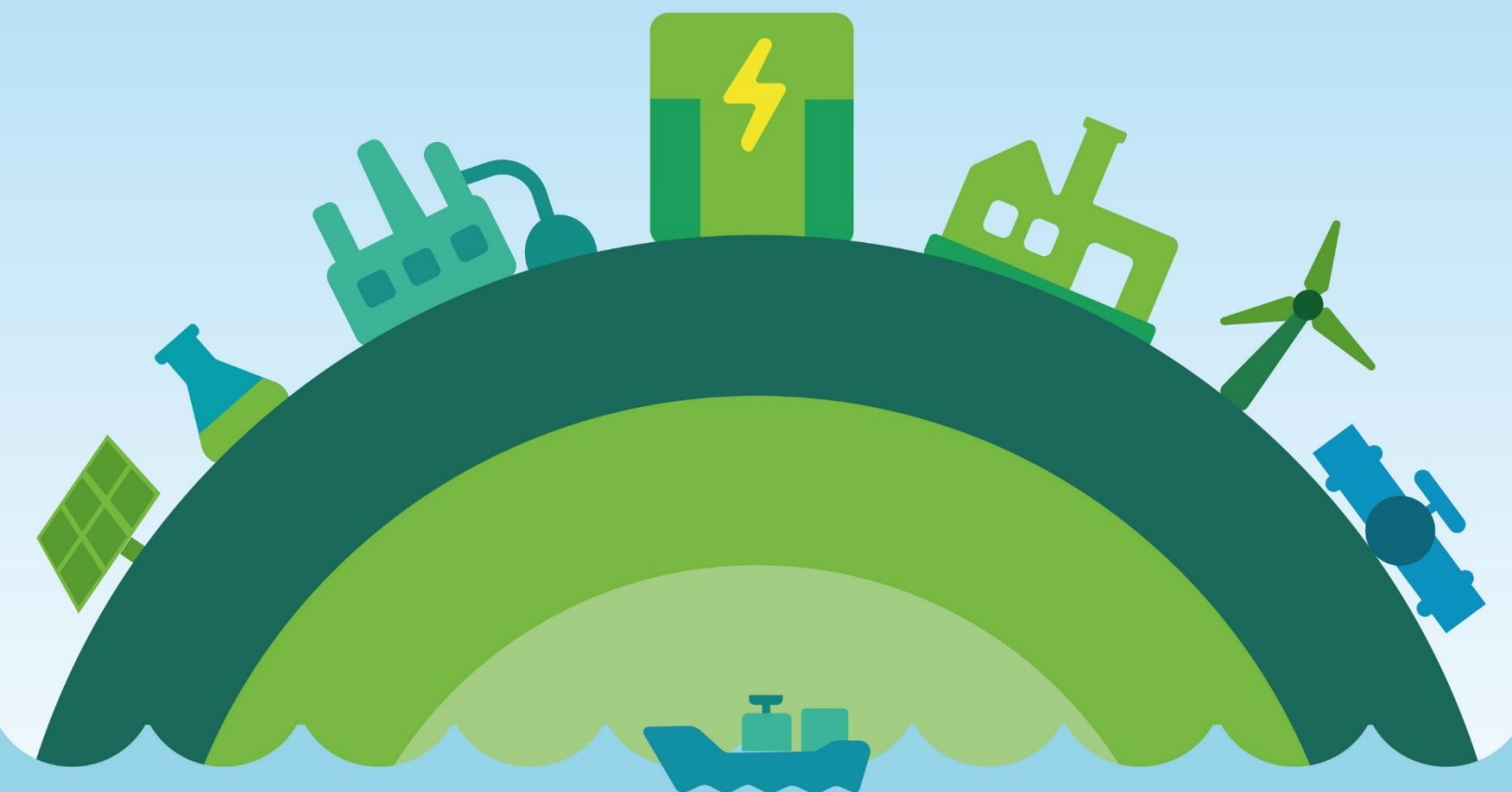


Propuesta para fortalecer el equipamiento científico-tecnológico para el I+D+i y del equipamiento para entrenamiento y formación técnica-profesional en RH2 en Chile.

Resumen Ejecutivo



“CONSULTORÍA PARA LA ELABORACIÓN DE PROPUESTA TÉCNICA PARA EL FORTALECIMIENTO DEL EQUIPAMIENTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO ENTORNO AL HIDRÓGENO VERDE Y DERIVADOS”

Versión ejecutiva

Licitación ID: 1606 – 39 – LP24

Este informe ejecutivo tiene como propósito ofrecer una síntesis clara y concisa del estudio desarrollado, destacando sus principales conclusiones, propuestas y actividades realizadas. Se trata de una versión resumida del informe completo, el cual contiene el detalle de la información levantada, el análisis técnico y metodológico, y la totalidad de los antecedentes recopilados durante el desarrollo del proyecto. Esta versión ejecutiva busca facilitar una lectura ágil que permita comprender los hallazgos más relevantes, remitiendo al documento principal para una revisión en profundidad.

Octubre 2025

PROPUESTA PARA FORTALECER EL EQUIPAMIENTO CIENTÍFICO-TECNOLÓGICO PARA EL I+D+I Y DEL EQUIPAMIENTO PARA ENTRENAMIENTO Y FORMACIÓN TÉCNICA-PROFESIONAL EN RH2 EN CHILE

Proyecto ejecutado por



-
- Director del estudio: Dr. Mario Toledo
 - Especialista en hidrógeno y energía: Cristóbal Monzó
 - Especialista en análisis financiero de proyectos: Nicolás Becker
 - Especialista en procesos participativos y análisis de datos cualitativos: Jackson Arancibia
 - Especialista en diseño gráfico: Cristián León
 - Personal de apoyo: - Javier Brito
- Ignacio Benavente
- Lars Schwarze
-

Mandante: Agencia Chilena de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AGCID)

Proceso licitatorio: ID: 1606 – 39 – LP24

Proyecto: *“Propuesta para fortalecer el equipamiento científico-tecnológico para el I+D+i y del equipamiento para entrenamiento y formación técnica-profesional en RH2 en Chile”*

Disclaimer

Este estudio ha sido realizado en el marco del Proyecto Team Europe Desarrollo del Hidrógeno Renovable en Chile (Proyecto Team Europe RH2), el cual es cofinanciado por la Unión Europea y el Ministerio Federal de Economía y Protección del Clima de Alemania (BMWK), e implementado por la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH y la Agencia Española de Cooperación Internacional al Desarrollo (AECID). Así, este documento se ha realizado con la ayuda financiera de la Unión Europea, a través de la AECID. Las opiniones expresadas en el mismo no representan necesariamente la opinión oficial de la Unión Europea ni de la AECID.

Índice

Resumen ejecutivo	6
Introducción	8
1 Estado del arte.....	9
2 Objetivos del estudio	10
2.1.1 Objetivo general	10
2.1.2 Objetivos Específicos.....	10
2.1.3 Alcances del estudio	10
3 Metodología.....	11
4 Desafíos de infraestructura y equipamiento de los centros I+D+i y de las instituciones formativas	12
4.1 Necesidades y problemáticas en infraestructura.....	12
4.2 Necesidades y problemáticas en equipamiento científico y tecnológico	13
4.3 Necesidades y problemáticas en equipamiento técnico.....	14
5 Conclusiones del levantamiento	15
5.1 Corto Plazo (hasta 2027).....	16
5.2 Mediano Plazo (hasta 2030).....	17
5.3 Largo Plazo (2030 en adelante)	18
5.4 Tipologías de equipamiento.....	19
5.4.1 Tipología de equipamiento científico y tecnológico para proyectos relacionados con hidrógeno verde y sus derivados	22
5.4.2 Tipología de equipamiento técnico para proyectos relacionados con hidrógeno verde y sus derivados	33
6 Costos asociados a cada tipología	39
6.1 Mecanismos de financiamiento.....	41
7 Propuesta de red de colaboración	44
7.1 Objetivos de la Red Nacional de Colaboración:	44
7.2 Participantes y alcance.....	45
7.3 Gobernanza y Sistema de Adhesión	46
7.4 Sostenibilidad y Modelo de Negocio	46
7.5 Despliegue gradual al 2030	47
8 Conclusiones generales	49
8.1.1 Puntos críticos y conclusiones generales.....	49
8.1.2 Brechas críticas de equipamiento y capacidades	49
8.1.3 Capital humano y gobernanza	49
8.2 Proceso de levantamiento de información	50
8.3 La Red Nacional de Colaboración	50
8.4 Desafíos Estructurales	50
8.5 Recomendaciones estratégicas.....	51
8.6 Conclusiones asociadas a los objetivos específicos	52
8.7 Consideraciones Finales.....	52
9 Bibliografía	53

Resumen ejecutivo

El hidrógeno verde y sus derivados representan una estrategia clave para Chile en la transición energética, buscando convertirse en un líder mundial en su producción y exportación. En este contexto, este estudio busca establecer las bases para fortalecer el equipamiento científico, tecnológico y técnico en Chile, y crear una red nacional para la investigación, desarrollo, innovación (I+D+i) y la formación técnico-profesional en el ámbito del hidrógeno verde y sus derivados, para que permitan orientar decisiones estratégicas para el fortalecimiento del ecosistema nacional en materia de investigación, desarrollo, innovación y formación de capital humano para el país.

La metodología del estudio considera el levantamiento de antecedentes cuantitativos y cualitativos desde referentes nacionales e internacionales, mediante entrevistas, encuestas y visitas a terreno. Los referentes representan una muestra representativa de instituciones en distintas regiones del mundo en el ámbito de la investigación, desarrollo e innovación, así como entidades de formación técnico-profesional, ambos seleccionados por su experiencia y trayectoria en el ámbito del hidrógeno verde y sus derivados.

Este documento muestra los modelos de gobernanza y sostenibilidad implementados por las instituciones, identificando prácticas que permiten articular de manera efectiva capacidades técnicas y humanas. Se releva el perfil de los investigadores, personal técnico y equipos de apoyo involucrados en proyectos clave, así como las dinámicas de trabajo observadas en las visitas a terreno realizadas.

Respecto a los requerimientos de equipamiento científico, tecnológico y técnico, se generó una propuesta basada en el levantamiento de información realizado en instituciones y ecosistemas internacionales, identificando las brechas y elementos que les permitieron desarrollar su ecosistema de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) en torno al hidrógeno verde y sus derivados. Los requerimientos anteriormente mencionados se separan en las necesidades identificadas para el desarrollo en Chile de un ecosistema de I+D+i en torno al hidrógeno verde y sus derivados para distintas etapas definidas en corto plazo, correspondiente a dos años, seguido de mediano plazo, correspondiente a entre dos años y cinco años, y largo plazo, que corresponde a más de 5 años [1].

A corto plazo se revela que la capacidad instalada de electrolizadores en los centros de I+D+i chilenos es muy limitada: dos instituciones disponen de tecnología alcalina, tres de electrolizadores de membrana de intercambio de protones, PEM por sus siglas en inglés, y dos de membrana de intercambio de aniones, AEM por sus siglas en inglés, mientras ninguna cuenta con celdas electrolizadoras de óxido sólido, SOEC por sus siglas en inglés, además de los 7 electrolizadores identificados solo 3 se encuentran debidamente autorizados por la Superintendencia de electricidad y combustibles (SEC), mientras que los demás se encuentran en proceso de aprobación. Por ello, dotar a los laboratorios con electrolizadores, sistemas de acondicionamiento, tanques de gas comprimido y equipamiento analítico básico se sitúa como prioridad urgente para el desarrollo de un ecosistema de I+D+i, debido a que es el equipamiento requerido sobre todo para la investigación y generación de nuevo conocimiento, así como establecer bancos de prueba que permitan formar técnicos en operación y mantenimiento de sistemas hidrógeno verde.

En base a la información levantada se identificó que en el mediano plazo es de gran importancia contar con reactores químicos para producir derivados del hidrógeno, ya que el hidrógeno verde podría ser utilizado incluso de manera más efectiva al ser parte de compuestos químicos más complejos, accediendo a distintas condiciones para su almacenamiento, uso y manejo, además se propone asegurar la adopción de softwares especializados para simulación, diseño y análisis de datos, ya que más de la mitad de las instituciones nacionales no invierte en herramientas digitales avanzadas; simultáneamente, se requiere equipamiento de uso final a escala representativa y que las empresas o laboratorios acreditados para certificación cuenten con los protocolos y equipos necesarios para las

certificaciones que puedan requerir las tecnologías desarrolladas en Chile según estándares internacionales y de esta manera cerrar el ciclo experimental para desarrollar soluciones de alto valor agregado.

A largo plazo, Chile debe descentralizar su infraestructura de I+D+i mediante la implementación de laboratorios modulares distribuidos por macrozonas, con tal de optimizar el uso eficiente de la energía renovable disponible para las actividades asociadas a I+D+i en torno a hidrógeno verde, considerando además que bajo tales condiciones, los puntos de interés y concentración de capital humano especializado en hidrógeno renovable a nivel nacional se encontrarán en estas zonas con alta disponibilidad de energías renovables. Además se propone la creación de parques de prueba semiindustriales, con la participación activa de empresas privadas, universidades y centros de formación, así como de instituciones públicas encargadas de financiamiento y regulación. De esa manera será posible validar en condiciones reales las tecnologías desarrolladas, impulsar la transferencia tecnológica al sector productivo y asegurar que Chile aproveche plenamente su potencial renovable, al mismo tiempo que forma capital humano calificado para competir a nivel global en la cadena de valor del hidrógeno verde. (Ver *Figura 1*)

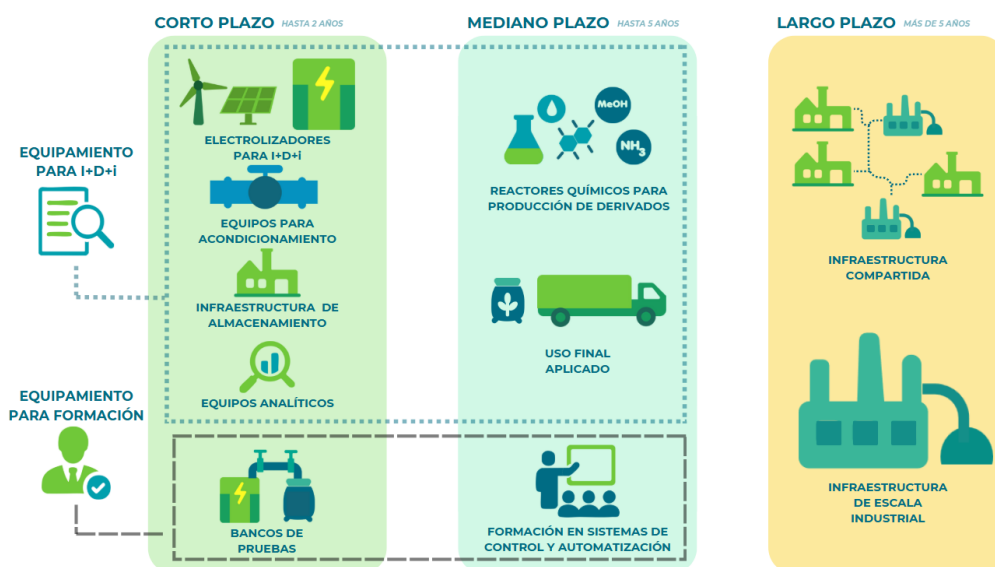


Figura 1: Priorización de necesidades de equipamiento científico, tecnológico y técnico en hidrógeno verde y derivados en el ecosistema de I+D+i e instituciones formativas.

Como parte del estudio, se elaboró una propuesta de Red Nacional de Colaboración orientada a articular y fortalecer las capacidades de investigación, desarrollo, innovación y formación técnica en torno al hidrógeno verde y sus derivados. Esta red se concibe como una plataforma de cooperación entre instituciones públicas, privadas y académicas, que busca optimizar el uso del equipamiento científico y tecnológico existente, promover el desarrollo conjunto de proyectos, y facilitar la transferencia de conocimiento a nivel nacional. Su diseño contempla un modelo de gobernanza participativo, con mecanismos de adhesión institucional, sostenibilidad financiera y coordinación técnica, permitiendo así consolidar una infraestructura distribuida y eficiente que impulse la generación de soluciones tecnológicas, la formación de capital humano y la descentralización de la I+D+i en el país.

Introducción

El hidrógeno verde se ha posicionado como un vector energético estratégico en la transición hacia economías bajas en carbono, por su capacidad para descarbonizar sectores intensivos en emisiones como la industria pesada, el transporte de carga, la producción de fertilizantes y la generación de energía en zonas aisladas. Su flexibilidad, capacidad de almacenamiento energético y compatibilidad con sistemas eléctricos renovables lo convierten en una opción relevante para diversificar matrices energéticas y avanzar hacia la carbono neutralidad [1].

A nivel internacional, países como Estados Unidos, la Unión Europea, China, Japón y Corea del Sur han desarrollado estrategias orientadas al fortalecimiento de capacidades tecnológicas y productivas en torno al hidrógeno verde. Estas estrategias incluyen el despliegue de infraestructura para la producción mediante electrólisis, la creación de centros tecnológicos, programas de subsidios e incentivos, y la promoción de certificaciones para el comercio internacional. En Europa, se han implementado mecanismos como la European Clean Hydrogen Alliance y el programa Horizon Europe para estandarizar tecnologías, escalar soluciones industriales y promover la cooperación público-privada [2]. Estados Unidos ha activado su programa de hubs regionales de hidrógeno, que integra producción, distribución, demanda industrial e innovación aplicada con financiamiento federal [3]. En paralelo, China se ha consolidado como uno de los principales actores globales en manufactura de electrolizadores, instalación de estaciones de carga de hidrógeno y desarrollo de políticas sectoriales, mientras Japón y Corea del Sur han impulsado estrategias orientadas a la movilidad, reconversión industrial y generación descentralizada [4] [5].

En Chile, la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde [6] y el Plan de Acción 2023–2030 han definido un marco de acción con visión de largo plazo [7]. No obstante, el ecosistema nacional de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) aún presenta desafíos estructurales. Las capacidades científicas y tecnológicas se concentran en un número limitado de instituciones, principalmente en la zona central del país. Asimismo, existe escasa disponibilidad de equipamiento especializado, baja articulación interinstitucional y una débil sistematización de los proyectos desarrollados. A esto se suma la ausencia de una red nacional que articule infraestructura científica y formativa.

Como consecuencia de estas limitaciones, el fortalecimiento de capacidades de I+D+i y la formación de capital humano técnico y profesional son condiciones habilitantes para que Chile logre consolidarse como un actor relevante en la cadena de valor global del hidrógeno verde. El presente estudio busca contribuir al cierre de estas brechas mediante la caracterización de equipamiento existente, la identificación de necesidades tecnológicas, y el análisis de referentes internacionales. Los resultados permitirán orientar decisiones estratégicas, priorizar inversiones y avanzar hacia un modelo de gobernanza territorial y colaborativo, alineado con una industria sostenible y competitiva a nivel global.

1 Estado del arte

Para más información revisar capítulo "1. Estado del arte" del informe completo.

El desarrollo del hidrógeno verde a nivel global se encuentra en una etapa de consolidación acelerada. En 2022, la demanda mundial de hidrógeno alcanzó las 95 millones de toneladas, pero menos del 1 % correspondió a hidrógeno de bajas emisiones, con una producción por electrólisis aún incipiente, pero en crecimiento (35 % respecto al año anterior), según la Agencia Internacional de Energía.

En este escenario, la Unión Europea ha delineado una hoja de ruta ambiciosa: alcanzar 40 GW de capacidad de electrólisis y producir 10 millones de toneladas de hidrógeno verde al 2030. Esta estrategia se apoya en el European Green Deal y contempla no solo metas productivas, sino también el fortalecimiento de capacidades formativas e institucionales mediante plataformas como Clean Hydrogen Joint Undertaking, TeachHy y redes como Hydrogen Europe.

Estados Unidos, por su parte, ha invertido 7.000 millones USD en la creación de siete centros regionales H2Hubs, con miras a producir 3 millones de toneladas de hidrógeno limpio al año. Además, programas como Hydrogen Shot y H2EDGE buscan reducir costos e impulsar la formación técnica. Sin embargo, la administración actual ha generado incertidumbre entre la comunidad investigadora al limitar la implementación de la Inflation Reduction Act, afectando la continuidad del financiamiento público a energías limpias.

En China, se observa una expansión acelerada, con más de 300 proyectos activos y una hoja de ruta nacional que prioriza la producción masiva, la estandarización y la creación de infraestructura. Su Programa Nacional Clave de I+D ha destinado más de 78 millones USD a proyectos distribuidos en toda la cadena de valor, consolidando al país como líder en manufactura de electrolizadores y despliegue tecnológico.

En contraste, Chile enfrenta importantes desafíos estructurales. A pesar de contar con una estrategia nacional y un plan de acción hasta 2030, el país carece de una red sólida y articulada de instituciones de I+D+i. Las brechas incluyen insuficiencia de infraestructura científica, escasa articulación entre investigación y formación técnica, y limitados mecanismos de financiamiento continuo. Mientras en Europa y EE.UU. existen consorcios y programas institucionalizados que integran a la academia, la industria y el gobierno, en Chile estas articulaciones son aún incipientes.

No obstante, el país posee ventajas comparativas relevantes: el desierto de Atacama con la mayor radiación solar global, superior a 3.800 kWh/m², y Magallanes con un potencial eólico relevante considerando velocidades promedio del aire de entre 30 y 40 km/h a 100 metros de altura. Estas condiciones posicionan a Chile como un actor estratégico para el desarrollo del hidrógeno verde, pero para aprovechar este potencial es indispensable construir una infraestructura tecnológica distribuida, fomentar la formación de capital humano especializado y consolidar capacidades territoriales mediante políticas públicas sostenidas e inversión estratégica.

En este contexto, el presente estudio se plantea como un insumo técnico clave para apoyar la toma de decisiones en torno a la planificación, inversión y fortalecimiento del ecosistema nacional del hidrógeno verde.

2 Objetivos del estudio

El presente capítulo expone los objetivos que orientan el desarrollo de este estudio, definidos a partir de los requerimientos establecidos en las bases técnicas de la licitación pública ID: 1606 – 39 – LP24.

2.1.1 Objetivo general

El objetivo general es establecer las bases para fortalecer el equipamiento científico, tecnológico y técnico en Chile, y crear una red nacional para la investigación, desarrollo, innovación (I+D+i) y la formación técnico-profesional en el ámbito del hidrógeno verde y sus derivados.

2.1.2 Objetivos Específicos

A continuación, se presentan los objetivos específicos de la licitación pública *ID: 1606 – 39 – LP24*. En este documento se abarca el contenido de los objetivos específicos.

1. Realizar un análisis del equipamiento científico, tecnológico y técnico utilizado por instituciones internacionales destacadas en hidrógeno verde, derivados y afines. Incluir capacidades, perfiles profesionales y planes de sostenibilidad.
2. Hacer un catastro y análisis del equipamiento existente en Chile, investigadores/as, formadores/as y proyectos realizados.
3. Identificar las necesidades nacionales de equipamiento en I+D+i y entrenamiento técnico.
4. Proponer tipologías de equipamiento necesarias para satisfacer las necesidades identificadas.
5. Estimar los costos asociados a cada tipología propuesta, incluyendo operación, mantenimiento y proveedores.
6. Desarrollar planes de sostenibilidad para cada tipología propuesta, incluyendo modelo de negocio y gobernanza.
7. Desarrollar material gráfico, validar las propuestas y realizar actividades de difusión.

2.1.3 Alcances del estudio

El estudio aborda cinco ámbitos principales de observación y análisis, tanto a nivel nacional como internacional: (1) caracterización del personal y equipamiento científico-tecnológico vinculado a proyectos de I+D+i en hidrógeno verde y sus derivados; (2) evaluación de la infraestructura disponible en instituciones de I+D+i y formativas; (3) revisión de proyectos relevantes en curso relacionados con hidrógeno verde; (4) identificación de desafíos y necesidades para el fortalecimiento de capacidades en Chile a lo largo de la cadena de valor; y (5) análisis de experiencias internacionales exitosas en I+D y formación de personal especializado en hidrógeno verde.

3 Metodología

- Para más información revisar el capítulo "3. Diseño de investigación" del informe completo.

La metodología de investigación adoptada fue de modalidad mixta, combinando enfoques cualitativos y cuantitativos. Se estructuró como un estudio no experimental con una temporalidad transversal y características descriptivas, centrándose en instituciones y proyectos relacionados con el hidrógeno verde en Chile y experiencias destacadas a nivel internacional.

Las unidades informantes fueron seleccionadas intencionadamente, bajo un criterio de experticia temática y representatividad institucional, e incluyeron:

- Empresas.
- Instituciones de la Administración Pública.
- Instituciones de Educación Superior (IES).
- Instituciones Privadas sin Fines de Lucro (IPSFL).

Para la recolección de datos, se aplicaron diversas técnicas, garantizando la confiabilidad y validez de los instrumentos utilizados:

- **Investigación Documental o de Fuentes Bibliográficas:** Esta fue la técnica principal para aproximarse al estado del arte del objeto de estudio, obteniendo una visión actualizada sobre el ecosistema de hidrógeno verde y sirviendo de base para el marco teórico y conceptual.
- **Entrevistas:** Se realizaron 16 entrevistas estructuradas a informantes clave (11 nacionales y 5 internacionales), representantes de instituciones dedicadas a I+D+i o a la formación técnico-profesional en hidrógeno verde. Las entrevistas abordaron siete módulos temáticos, incluyendo producción, potencial de descarbonización, sostenibilidad, exportación, escalabilidad, formación y gobernanza.
- **Encuestas:** Se implementó un proceso integral de encuestas con cuestionarios estructurados, aplicado a 21 instituciones nacionales y 8 entidades internacionales. La modalidad de aplicación fue exclusivamente virtual. Cabe destacar que las dimensiones de "desafíos" se enfocaron específicamente en el contexto nacional para contextualizar las problemáticas de Chile.
- **Visitas a Terreno:** Se concretaron 10 visitas (5 a nivel nacional y 5 a nivel internacional). Estas permitieron un levantamiento de información preciso y detallado mediante la observación directa de las condiciones reales de funcionamiento de las instituciones y la interacción con profesionales idóneos.
- **Talleres para la Validación de Información:** Se realizaron siete talleres, uno virtual y cinco presenciales en Antofagasta, Valparaíso, Biobío y Magallanes. El objetivo fue validar y complementar las propuestas que se presentaban según avances del estudio, en los primeros cuatro talleres se validó la propuesta de priorización de equipamiento, mientras que en los últimos tres se validó la propuesta de red nacional de colaboración en I+D+i para hidrógeno verde y derivados.

Los resultados obtenidos de este proceso metodológico permitieron un diagnóstico detallado de las brechas y capacidades en equipamiento, personal y tecnologías, tanto a nivel nacional como internacional.

4 Desafíos de infraestructura y equipamiento de los centros I+D+i y de las instituciones formativas

- Para más información respecto a la información levantada revisar los capítulos 4, 5, 6 y 7 del informe completo.
- Para más información respecto a los desafíos revisar el capítulo "8. Desafíos de infraestructura y equipamiento de los centros I+D+i y de las instituciones para la formación de personal" del informe completo.

En Chile, los centros de I+D+i y las instituciones formativas se enfrentan a múltiples desafíos en términos de infraestructura y equipamiento que limitan su capacidad para impulsar el desarrollo del hidrógeno verde. A partir del levantamiento de datos mediante encuestas específicas, entrevistas con actores clave y visitas a instalaciones representativas, se ha podido identificar la magnitud de las carencias tecnológicas, logísticas y de capital humano que afectan tanto a los laboratorios de investigación como a los talleres y bancos de prueba destinados a la formación técnico-profesional.

En el caso de los centros de I+D+i, estas brechas se manifiestan en la escasez de electrolizadores operativos, la falta de sistemas de acondicionamiento de hidrógeno, la insuficiente capacidad de almacenamiento avanzado y la ausencia de reactores para la síntesis de derivados. A ello se suma la limitada instrumentación analítica, como cromatógrafos de gases, analizadores elementales y equipos térmicos, que impide validar procesos con el rigor científico requerido. Adicionalmente, la concentración geográfica de estas capacidades en unas pocas macrozonas del país agrava las desigualdades territoriales y dificulta la transferencia de tecnología hacia regiones con alto potencial de generación renovable.

Por su parte, las instituciones formativas presentan retos similares, aunque con especificidades propias de la enseñanza práctica: prácticamente no existen bancos de prueba de alta presión para celdas de combustible o estaciones de compresión, los talleres carecen de electrolizadores de demostración y los espacios formativos carecen de equipamiento real que reproduzca escenarios industriales. Esta realidad limita la adquisición de competencias operativas en estudiantes y técnicos, quienes carecen de la oportunidad de trabajar con sistemas reales de hidrógeno verde antes de ingresar al mercado laboral.

Este capítulo explora cada uno de estos desafíos, agrupándolos en categorías que abarcan desde la adquisición y mantenimiento de equipos críticos hasta la formación especializada en operación y seguridad. Al describir el Estado actual de la infraestructura y contrastarlo con estándares internacionales, se pondrá de manifiesto la urgencia de definir prioridades de inversión y diseño curricular que permitan cerrar la brecha tecnológica y formar capital humano alineado con las necesidades de una industria emergente.

4.1 Necesidades y problemáticas en infraestructura

- Para más información revisar el capítulo "8.1 Necesidades y problemáticas en infraestructura" del informe completo.

Las instituciones de I+D+i y los centros de formación técnico-profesional en Chile enfrentan brechas estructurales que limitan el despliegue de proyectos vinculados al hidrógeno verde. Una de las principales debilidades es la concentración territorial de capacidades en la zona central del país, lo que

genera desigualdades en el acceso a infraestructura especializada en regiones estratégicas con alto potencial renovable, como Antofagasta o Magallanes. Para revertir esta situación, se propone avanzar hacia un modelo descentralizado mediante la implementación de laboratorios modulares distribuidos por macrozonas que integren espacios para electrólisis, almacenamiento y uso final, adaptables a las necesidades técnicas de cada región, los cuales deben ser impulsados por media de la colaboración entre los sectores industrial, público y académico, buscando la generación de clusters que permitan fortalecer esta infraestructura.

En el largo plazo, según la información levantada de los proyectos internacionales, el escalamiento de los proyectos I+D+i es un factor determinante en la aplicabilidad de las tecnologías e innovaciones desarrolladas en la industria, por lo que será necesario habilitar parques de prueba de carácter semiindustrial, capaces de evaluar tecnologías en condiciones operativas reales. Estos espacios permitirán la integración de sistemas de electrólisis de mayor escala, junto con soluciones de almacenamiento energético y equipamiento orientado a aplicaciones finales, como calderas, motores o celdas de combustible. Además, deberían contar con infraestructura de carga de hidrógeno comprimido, sistemas de enfriamiento específicos y zonas de demostración abiertas a terceros, lo que permitirá cerrar el ciclo de validación tecnológica y favorecer su transferencia hacia el sector productivo.

Los talleres universitarios y de formación técnica requieren adecuaciones básicas que permitan prácticas seguras con hidrógeno según los estándares establecidos por la Superintendencia de Electricidad y Combustibles por medio del Decreto 13 de 2022. Esto implica la habilitación de espacios compactos con redes de gas y ventilación forzada, así como la incorporación de bancadas con equipamiento de pequeña escala para la producción, compresión y detección de hidrógeno. Estas mejoras permitirán que los estudiantes adquieran competencias prácticas en operación y mantenimiento de sistemas asociados al H₂V. De forma complementaria, es necesario actualizar los planes estratégicos nacionales, incorporando estudios de viabilidad económica y modelos de demanda potencial, particularmente en zonas aisladas o industriales, donde la disposición a pagar por energía libre de carbono podría abrir nuevas oportunidades de implementación, en primera instancia los recursos necesarios para la ejecución de estos estudios serán principalmente recursos humanos, con gran énfasis investigativo y analítico.

4.2 Necesidades y problemáticas en equipamiento científico y tecnológico

- Para más información revisar el capítulo “8.2 Necesidades y problemáticas en equipamiento científico y tecnológico” del informe completo.

El análisis del equipamiento especializado revela que Chile está rezagado en la disponibilidad de herramientas científicas y tecnológicas para hidrógeno verde. En el ámbito del equipamiento analítico, cerca de la mitad de los laboratorios no dispone de cromatógrafos de gases, analizadores térmicos ni analizadores elementales, lo que limita su capacidad para determinar la pureza del hidrógeno y caracterizar con precisión catalizadores, materiales de membrana y electrodos, entre otros componentes esenciales, afectando el rigor científico de sus investigaciones.

En lo referido a electrolizadores, la capacidad instalada a nivel nacional resulta aún limitada. Entre las instituciones encuestadas, únicamente dos disponen de tecnología alcalina, tres cuentan con sistemas tipo PEM y dos con tecnología AEM, sin registrarse presencia de equipos SOEC. Esta brecha tecnológica restringe el desarrollo de conocimiento técnico especializado y la posibilidad de escalar soluciones que actualmente se validan en mercados internacionales de referencia. En consecuencia,

se considera prioritario, a corto plazo, fortalecer las capacidades de I+D+i mediante la incorporación de electrolizadores de baja potencia (≤ 50 kW) de tipo alcalino, PEM y AEM.

Los sistemas de acondicionamiento del hidrógeno (compresores, secadores y purificadores) son escasos: solo tres centros reportan un compresor o booster y apenas uno cuenta con personal de mantenimiento especializado. Esto rompe la cadena experimental, pues sin ajustar presión o pureza no es posible validar tecnologías de almacenamiento o uso final, por lo que se identifica la falta de personal técnico calificado, sobre todo en temas de operación y mantenimiento de equipos.

4.3 Necesidades y problemáticas en equipamiento técnico

- Para más información revisar el capítulo “8.3 Necesidades y problemáticas en equipamiento técnico” del informe completo.

En el ámbito del equipamiento técnico estrictamente formativo y operativo, las instituciones chilenas carecen prácticamente de bancos de prueba de alta presión para celdas de combustible, estaciones de compresión o electrolizadores de demostración. Esto repercute directamente en la escasez de personal con experiencia práctica, ya que los estudiantes y técnicos no pueden formarse en entornos que simulen condiciones industriales reales.

Para la formación de capital humano avanzado, se requieren equipos de uso final a escala representativa: celdas de combustible, calderas industriales adaptadas para quemar, motores de combustión interna, entre otros. Estos equipos, disponibles en los laboratorios de ingeniería y centros de I+D+i, permitirán realizar prácticas de combustión, integración de sistemas y control de parámetros operativos, cerrando la brecha entre teoría y práctica, que se ha identificado como una problemática recurrente según los centros e instituciones informantes de este estudio. Asimismo, la vinculación con la industria local mediante modelos de formación dual o aprendizaje por alternancia podría fortalecer estas capacidades, facilitando el acceso a entornos reales de trabajo y promoviendo la transferencia de conocimiento aplicado.

La carencia de proveedores locales obliga a importar repuestos y equipos técnicos, lo que encarece los costos y retrasa las entregas. Tampoco existen planes formales de mantenibilidad para asegurar la operatividad a largo plazo; las garantías de equipos (generalmente 1-1,5 años) se agotan rápidamente y, al no haber servicio postventa local, muchos centros deben reemplazar o enviar equipos al extranjero ante cualquier falla. Por ello, se sugiere desarrollar acuerdos con fabricantes internacionales para garantizar contratos de soporte técnico local, capacitar a técnicos en mantención y crear un catálogo nacional de proveedores certificados para el hidrógeno verde, que incluya repuestos y servicios de calibración.

En síntesis, las brechas identificadas evidencian limitaciones para la formación de personal operativo en el uso, mantenimiento y seguridad de las instalaciones, así como para la mantención de la infraestructura en condiciones óptimas. En respuesta, las propuestas de priorización, coherentes con las conclusiones del estudio, plantean un plan de acción a corto, mediano y largo plazo orientado a fortalecer las capacidades nacionales mediante la dotación de equipamiento científico, tecnológico y técnico esencial, permitiendo a Chile avanzar hacia una industria del hidrógeno verde competitiva y sostenible.

Asimismo, se recomienda que este proceso se articule con una política industrial orientada a la manufactura tecnológica, siguiendo el ejemplo de países que han impulsado sus ecosistemas de innovación mediante incentivos a la producción local de equipamiento científico y tecnológico. Integrar esta dimensión permitiría no solo reducir la dependencia de importaciones y los costos

asociados, sino también fomentar la creación de capacidades nacionales de diseño, fabricación y mantenimiento de componentes críticos, fortaleciendo la cadena de valor del hidrógeno verde y generando nuevas oportunidades industriales de alto valor agregado para el país.

5 Conclusiones del levantamiento

- Para más información revisar el capítulo “10. Conclusiones del levantamiento” del informe completo.

Los comentarios recopilados destacan varios desafíos estructurales para el desarrollo del ecosistema de hidrógeno verde. En primer lugar, la ausencia de una demanda clara y sostenida desincentiva tanto la inversión como la adopción tecnológica por parte de la industria, generando una brecha entre la oferta científica y su aplicabilidad. En segundo lugar, se evidencia una desconexión entre los desarrollos de investigación y las necesidades prácticas de las empresas, lo que resalta la importancia de fortalecer los vínculos entre ambos mundos bajo una lógica de empuje y atracción.

A esto se suma una preocupante escasez de personal técnico calificado, atribuida a debilidades en la formación y la falta de políticas eficaces para mejorar la empleabilidad. Finalmente, se subraya el rol estratégico de la vinculación internacional, señalando que la participación activa en ferias, presentación de resultados científicos en congresos, generación de instancias que convoquen a actores clave, y redes globales debe ser fomentada desde el Estado. En conjunto, estos elementos sugieren que avanzar en hidrógeno verde requiere más que infraestructura: es necesario un ecosistema articulado entre mercado, capacidades humanas y colaboración público–privada.

Por su parte este estudio, basado en encuestas a instituciones de I+D+i y centros de formación, entrevistas a expertos nacionales e internacionales, visitas de campo a instalaciones clave y revisión de fuentes confiables, permite un diagnóstico de brechas y capacidades en equipamiento para el desarrollo del hidrógeno verde. Estas conclusiones, fundamentadas en la comparación sistemática de infraestructura, personal y tecnologías disponibles frente a estándares globales, resultan esenciales para orientar decisiones estratégicas de inversión y formación de capital humano, garantizando que Chile avance de manera competitiva y sostenible en la cadena de valor del hidrógeno verde. A continuación, como se puede apreciar en la Figura N°2, se sintetizan las conclusiones detalladas que sustentan la priorización de necesidades de equipamiento en tres horizontes temporales: corto plazo (hasta 2027), mediano plazo (hasta 2030) y largo plazo (2030 en adelante) [8].

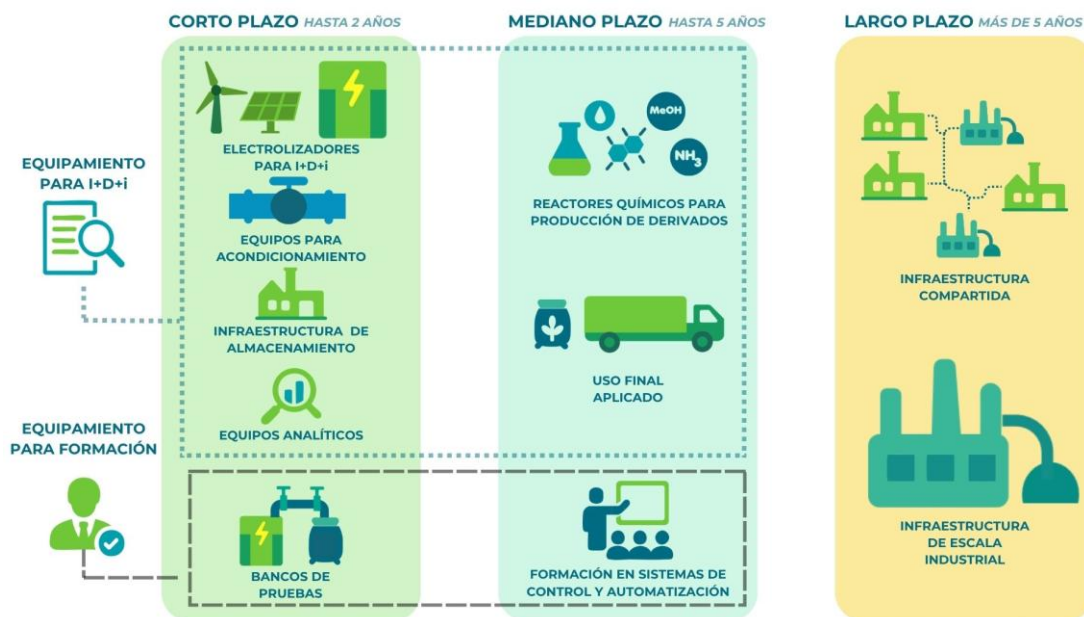


Figura N°2 Esquema de priorización de necesidades de equipamiento. Para acceder a la interpretación completa de este esquema, revisar el capítulo “10. Conclusiones del levantamiento”.

5.1 Corto Plazo (hasta 2027)

- Para más información revisar el capítulo “10.1 Corto plazo (hasta 2027)” del informe completo.

A nivel nacional, la capacidad instalada de electrolizadores es extremadamente limitada. Solo 2 de 14 centros encuestados disponen de tecnología alcalina, 3 promocionan electrolizadores PEM, 2 cuentan con modelos AEM y ninguno tiene electrolizadores SOEC. Esta carencia impide la producción experimental de hidrógeno verde en la mayoría de los laboratorios, frenando la generación de know-how local y postergando la comparación directa de rendimientos en condiciones típicas de Chile. Por ello, dotar a los centros de I+D+i con electrolizadores debe entenderse como la prioridad más urgente a corto plazo.

Una vez producido el hidrógeno, es imprescindible contar con equipos de acondicionamiento (compresores, secadores y sistemas de purificación) que permitan ajustar presión, pureza y temperatura de manera controlada. Actualmente, solo tres instituciones reportan algún compresor o booster, y apenas una declara personal de mantenimiento para ese equipamiento. Esta insuficiencia interrumpe la “cadena experimental” y no permite validar tecnologías de almacenamiento, transporte o uso final de manera integral.

El almacenamiento de Hidrógeno verde en condiciones seguras y eficientes requiere infraestructura especializada. De los centros I+D+i estudiados, únicamente cuatro disponen de tanques de gas comprimido, y ninguno informa de sistemas de almacenamiento criogénico o en hidruros metálicos. Sin estas capacidades, los proyectos no pueden evaluar distintos métodos de almacenamiento, lo cual constituye un cuello de botella para el desarrollo de protocolos de seguridad y eficiencia adaptados al clima y las condiciones chilenas. Por esta razón, habilitar infraestructura de almacenamiento de gas comprimido a distintas presiones, incluir aspectos de almacenamiento avanzado también debe priorizarse antes de 2027.

El análisis e investigación analítica es indispensable para cualquier investigación rigurosa. Casi la mitad de los centros encuestados carece de instrumentación básica: el 53% no tiene analizadores de gas, cromatógrafos, equipos de análisis térmico o analizadores elementales. Esto impide medir con precisión la pureza del hidrógeno, cuantificar compuestos en mezclas de gas, caracterizar materiales y catalizadores, entre otras actividades que requieren de este equipamiento analítico para realizar investigación y desarrollo. Sin estos instrumentos, las publicaciones carecen de validación experimental, y los desarrollos no cumplen con estándares internacionales. Es importante poder dotar a los laboratorios con al menos analizadores de gas multifuncionales, cromatógrafos de gases, equipos térmicos y analizadores para priorizar la capacidad de producir datos confiables para avanzar en I+D+i.

Con los equipos anteriormente mencionados y la infraestructura adecuada se pueden generar laboratorios y sobre todo bancos de pruebas que permitan no solo realizar actividades de I+D+i, sino que también generar instancias de formación en las áreas más técnicas como mantenimiento, operación y seguridad con equipos asociados al I+D+i, abarcando una necesidad levantada con distintos instrumentos, que es la falta de personal del área técnica. Dentro de las tipologías que este estudio propone (*Ver Capítulo "5.4 Tipologías de equipamiento"*) se proponen bancos de pruebas enfocados en la formación de personas en materia de operación, mantenimiento, seguridad y control.

Finalmente, un quinto elemento fundamental a corto plazo son los bancos de prueba en los centros de formación técnica. Las instituciones que forman capital humano reportan una oferta de capacitaciones específicas, pero ninguna dispone de equipamiento real de alta presión, bancos de prueba de celdas de combustible o estaciones de compresión para prácticas operativas. Esta carencia impide la formación práctica de técnicos y profesionales, quienes salen al mercado sin experiencia en operación y mantenimiento de sistemas de hidrógeno verde. La creación de bancos de prueba básicos, con electrolizadores de baja potencia, compresores de laboratorio y sistemas de monitoreo de seguridad, permitirá replicar escenarios industriales a pequeña escala y cerrar la brecha entre la teoría y la práctica en la formación técnica.

5.2 Mediano Plazo (hasta 2030)

- Para más información revisar el capítulo "10.2 Mediano plazo (hasta 2030)" del informe completo.

Más allá de las capacidades iniciales, el país requiere avanzar hacia etapas más complejas de la cadena de valor. En primer lugar, los reactores químicos para producir derivados del hidrógeno son prácticamente inexistentes en los centros de I+D+i nacionales. Ninguna de las instituciones encuestadas cuenta con plantas piloto o reactores de síntesis de derivados, y solo una ha planificado la adquisición de un equipo de producción de amoníaco. El único ejemplo operativo es la planta Haru Oni de HIF Global en Punta Arenas, pero esta opera en un contexto industrial y no en un laboratorio universitario o centro de investigación de alcance general, siendo esta una planta piloto de generación de gasolina basada en hidrógeno verde. Incorporar reactores de laboratorio avanzado o planta piloto de síntesis de derivados hasta 2030 es esencial para que Chile desarrolle capacidades endógenas en esta etapa de alto valor agregado.

La digitalización y el software especializado constituyen otra brecha clave. El 50% de las instituciones no utiliza software específico para aplicaciones que implican hidrógeno, y las que sí lo hacen invierten montos muy reducidos. Sin modelos y herramientas digitales de simulación de procesos, diseño de plantas, gestión de datos y control de sistemas, la investigación y la formación quedan desalineadas con las exigencias de la industria 4.0. A mediano plazo es prioritario garantizar licencias y capacitación en software para simulación de electrólisis, optimización de microrredes, diseño asistido y análisis de

datos, de modo que los investigadores y estudiantes adquieran competencias digitales homologables con las requeridas por grandes proyectos.

También resultan necesarios los equipos de uso final que permitan probar el hidrógeno en aplicaciones concretas: celdas de combustible de potencia intermedia, calderas industriales adaptadas a quemar mezclas de H₂ y combustibles fósiles, vehículos experimentales o motores de combustión adaptados. Si bien existen algunos prototipos de baja potencia (<100 kW) en diversos centros, su número es insuficiente para cubrir demostraciones de escalas representativas para la industria. Para 2030, es indispensable crear infraestructura de pruebas a escala semiindustrial, que incluya: celdas de combustible, calderas industriales para calor de proceso, motores de transporte pesado adaptados para hidrógeno, y equipos de generación distribuida basados en pilas de combustible. Así se podrán validar las soluciones desarrolladas a nivel piloto en entornos industriales reales.

5.3 Largo Plazo (2030 en adelante)

- Para más información revisar el capítulo “10.3 Largo plazo (2030 en adelante)” del informe completo.

A más largo plazo, el desafío es consolidar un ecosistema nacional, descentralizado e integrado. Actualmente, el 76% de las instituciones de I+D+i se concentra en las regiones Metropolitana y de Valparaíso. Esta centralización limita el desarrollo en regiones estratégicas para el despliegue de proyectos del hidrógeno verde, como Antofagasta y Magallanes. Para 2030, se propone implementar laboratorios modulares distribuidos en macrozonas con equipamiento que cubra desde electrólisis hasta almacenamiento y uso final. De este modo, se democratiza el acceso, se reducen costos de traslado de personal y muestras, y se promueve la cooperación interregional.

Además, se requiere infraestructura de I+D+i a escala industrial o semiindustrial que permita pruebas robustas de tecnologías emergentes. Aunque hay plantas piloto dispersas, Chile carece de parques tecnológicos con múltiples líneas de electrólisis, almacenamiento y uso final integrados. Para 2030, el objetivo es contar con instalaciones de validación de escala industrial o semiindustrial de electrólisis, acopladas a un banco de pruebas de almacenamiento y equipos de uso final como calderas, celdas y motores con potencias de escalas industriales. Esto brindará un entorno realista para probar la confiabilidad y la eficiencia de sistemas completos, cerrar el ciclo de I+D+i y garantizar la transferencia tecnológica a la industria.

En síntesis, el análisis nacional demuestra que, sin un fortalecimiento coordinado de infraestructura y equipamiento, Chile difícilmente alcanzará una industria de hidrógeno verde competitiva y autóctona. A corto plazo (hasta 2027) es imperativo dotar a los centros con electrolizadores, equipos de acondicionamiento, capacidades de almacenamiento y bancos de prueba para la formación técnica. A mediano plazo (hasta 2030), debe avanzarse en reactores de síntesis de derivados, software de simulación y equipos de uso final a escala representativa. A largo plazo (2030 en adelante), conviene descentralizar estas capacidades, crear instalaciones modulares en regiones clave y consolidar “parques de I+D+i” que integren desde la electrólisis hasta la producción de e-fuels y su aplicación industrial. Así Chile podrá aprovechar plenamente su potencial de energías renovables, formar capital humano calificado y competir de igual a igual en el mercado global de hidrógeno verde.

5.4 Tipologías de equipamiento

- Para más información revisar el capítulo “10.4 Tipologías de equipamiento” del informe completo.

Esta sección tiene por objetivo presentar una propuesta estructurada de tipologías de equipamiento científico, tecnológico y técnico que permitan organizar, describir y clasificar los equipos necesarios para el desarrollo de actividades de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i), así como de entrenamiento técnico profesional en torno al hidrógeno verde y sus derivados. Para ello, se ha adoptado como eje estructurante la cadena de valor del hidrógeno, dado su amplio reconocimiento tanto en la literatura técnica como en los distintos instrumentos de planificación nacional e internacional. Esta decisión metodológica permite garantizar la cobertura de los procesos implicados en la producción, acondicionamiento, uso, transporte y aprovechamiento del hidrógeno, además de facilitar la incorporación de futuras tecnologías que pudieran emerger a lo largo de esta misma cadena.

Las tipologías aquí definidas surgen a partir del análisis conjunto de fuentes secundarias y primarias: se ha considerado la experiencia previa de proyectos en curso, así como los resultados obtenidos mediante entrevistas, encuestas y visitas a terreno realizadas en el marco de este estudio. El objetivo fue generar una categorización flexible, coherente con el Estado actual del ecosistema nacional, pero también lo suficientemente abierta como para integrar innovaciones tecnológicas o nuevos equipos que surjan en los próximos años.

En atención al Objetivo N°4 del estudio, que solicita una priorización de las tipologías identificadas, se optó por utilizar un enfoque por horizonte temporal (corto, mediano y largo plazo), lo cual permite contextualizar el equipamiento requerido según la etapa de madurez tecnológica y las capacidades actuales del país. Es importante destacar que esta priorización no es prescriptiva, sino que debe entenderse como una recomendación estratégica: cada institución de I+D+i deberá definir sus adquisiciones específicas en función de sus líneas de trabajo, objetivos tecnológicos y realidades operativas.

Se presentan diez tipologías principales asociadas al desarrollo científico-tecnológico, representadas en la *Figura N°3*. Cabe señalar que la categoría de *escalamiento*, incluida en el gráfico, no se considera como una tipología en sí misma, sino como una etapa posterior de desarrollo a la que aspiran las instituciones que hayan consolidado sus capacidades básicas.



Figura 3: Propuesta de tipologías de equipamiento científico y tecnológico, priorizadas por horizonte temporal.

Complementando las tipologías de equipamiento científico y tecnológico orientadas a actividades de I+D+i, este estudio propone además una clasificación específica para el equipamiento técnico o bancos de pruebas con fines formativos. Estas tipologías se enfocan en el entrenamiento práctico del capital humano en distintas etapas de la cadena de valor del hidrógeno verde y sus derivados, considerando tanto competencias operativas como aspectos de seguridad, mantenimiento y control de procesos. A continuación, en la *Figura N°4* adjunta, se presentan los bancos de prueba propuestos, organizados según su aplicabilidad en el corto y mediano plazo. Esta diferenciación temporal busca orientar decisiones estratégicas de implementación y dotación de capacidades en función de los desafíos actuales y emergentes del ecosistema formativo nacional.



Figura N°4: Propuesta de tipologías de equipamiento técnico, priorizadas por horizonte temporal.

En las secciones siguientes se detallan cada una de estas tipologías, incluyendo su descripción general, subcategorías asociadas y ejemplos de equipamiento representativo. Esta sistematización busca contribuir a la planificación estratégica de inversiones en equipamiento, así como a la formulación de políticas públicas y proyectos que fortalezcan el ecosistema nacional de hidrógeno verde.

5.4.1 Tipología de equipamiento científico y tecnológico para proyectos relacionados con hidrógeno verde y sus derivados

- Para más información revisar el capítulo 10.4.1 del informe completo.

Esta sección desarrolla en detalle cada una de las tipologías de equipamiento científico y tecnológico propuestas para el fortalecimiento de proyectos de I+D+i en hidrógeno verde y sus derivados. Para cada tipología se incluye: una descripción del tipo de actividad de I+D+i que permite desarrollar, la identificación de sus especificaciones técnicas a través de los equipos principales y complementarios que la componen, el perfil de personal necesario para su operación y mantenimiento, incluyendo una descripción de los conocimientos y aptitudes con los que debe contar para una operación segura y controlada, y una propuesta de distribución territorial considerando criterios estratégicos para su implementación en distintas macrozonas del país.

La información presentada se construyó a partir de un proceso metodológico riguroso que combinó entrevistas a actores clave, encuestas a instituciones vinculadas al hidrógeno, visitas a terreno a centros relevantes a nivel nacional e internacional, y una revisión bibliográfica especializada. Asimismo, las necesidades a las que estas tipologías responden fueron validadas en los talleres presenciales y virtuales realizados durante el estudio, los cuales permitieron integrar la visión de representantes del sector público, la academia, la industria y la formación técnica profesional.

A continuación, se presentan las tipologías propuestas para poder categorizar el equipamiento que pueda cubrir las necesidades identificadas a lo largo del estudio y validadas en las instancias de talleres.

5.4.1.1 Infraestructura física



Infraestructura física

La infraestructura física constituye la base material sobre la cual se despliegan las capacidades de investigación, desarrollo e innovación en hidrógeno verde. Comprende edificios, laboratorios, salas técnicas, zonas de ensayo y espacios para montaje de equipos a escala laboratorio o piloto. Su disponibilidad es clave para instalar equipamiento especializado, garantizar condiciones seguras de operación y promover ambientes de aprendizaje y experimentación. Permite realizar desde estudios exploratorios hasta validaciones en entorno controlado, facilitando el trabajo interdisciplinario y colaborativo en cada eslabón de la cadena de valor.



Ubicación de la tipología

Ubicación recomendada:
Regiones Hub de hidrógeno:
-Región de Antofagasta
-Región de Valparaíso
-Región Metropolitana
-Región del Biobío
-Región de Magallanes



*Ubicación recomendada basada en actividades de las macrozonas.

Equipamiento

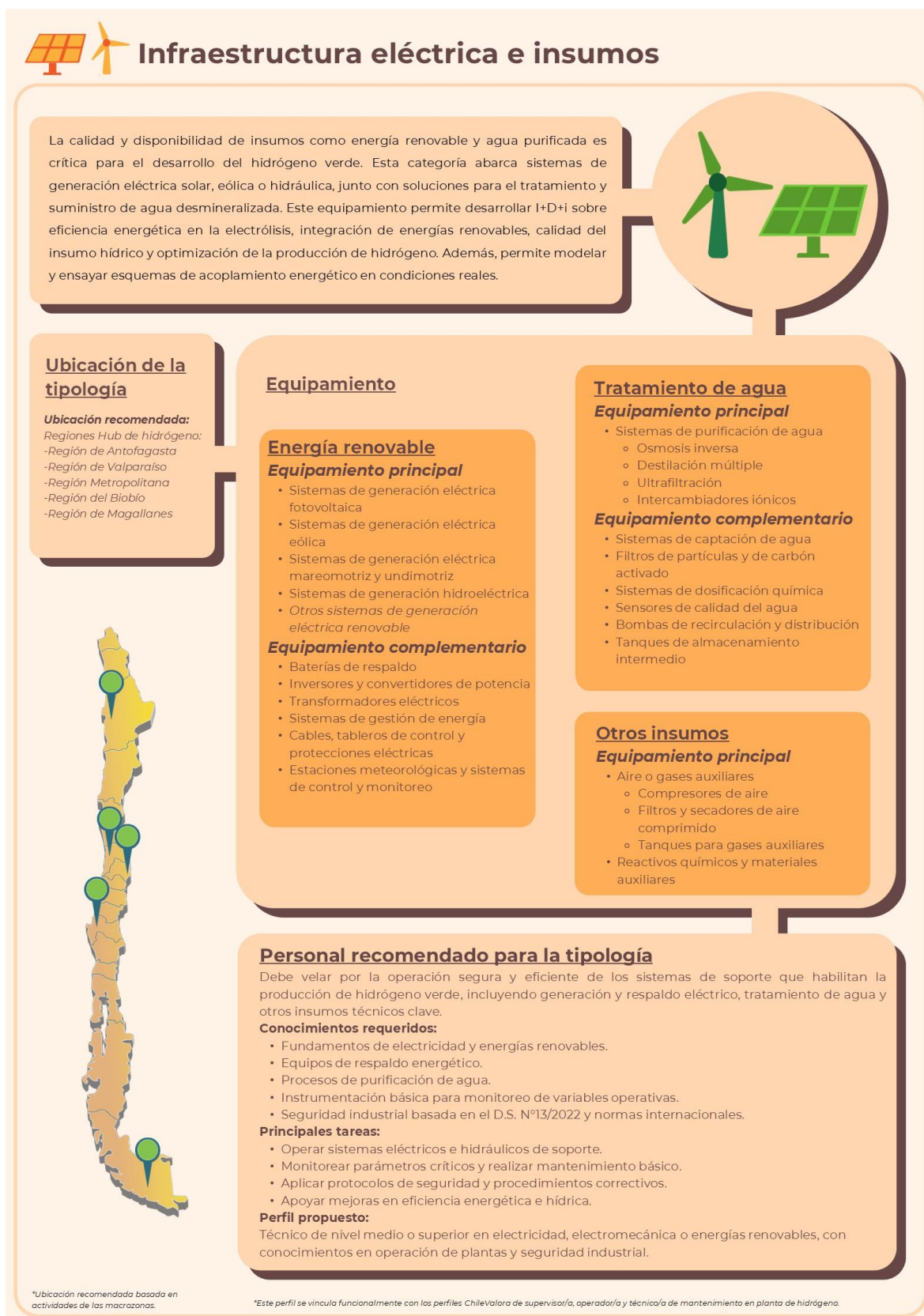
Infraestructura principal

- **Laboratorios técnicos especializados**
 - Laboratorios para producción experimental de hidrógeno, integrados con sistemas de energía renovable.
 - Laboratorios para análisis químico y caracterización de compuestos en todas las etapas de la cadena de valor.
 - Laboratorios de prototipado y validación de tecnologías emergentes.
 - Laboratorios para simulación y modelación de procesos asociados a generación, acondicionamiento y conversión energética.
- **Plantas piloto y unidades demostrativas**
 - Instalaciones piloto para la validación precomercial de tecnologías de producción, almacenamiento o conversión de hidrógeno.
 - Unidades de integración tecnológica que permitan combinar electrolizadores, compresores, sistemas de seguridad y control.
 - Espacios para escalamiento de procesos de generación de derivados como e-combustibles, amoníaco verde o metanol sintético.
 - Áreas adaptadas para el ensayo de uso final de H₂ y derivados.
 - Espacios habilitados para pruebas de escalamiento tecnológico, con posibilidad de evaluación en TRL intermedios.
- **Zonas de uso industrial aplicadas a investigación**
 - Salas acondicionadas para instalación temporal o permanente de equipos pesados como compresores, reactores o tanques utilizados en pruebas experimentales.
 - Estructuras de soporte técnico con refuerzo estructural, ventilación especializada y medidas de seguridad requeridas para manipulación de gases.
 - Áreas de ensayo en condiciones simuladas o reales para pruebas de campo asociadas a aplicaciones tecnológicas en etapa de validación.
- **Áreas formativas y de capacitación en contexto de I+D+i**
 - Salas técnicas para entrenamiento especializado en operación y mantenimiento de sistemas vinculados a la cadena de valor del hidrógeno.
 - Bancos de prueba diseñados con fines formativos que simulen condiciones de laboratorio e industrial para estudiantes y técnicos.
 - Aulas con equipamiento multimedia y herramientas digitales para apoyar la formación profesional vinculada a proyectos de I+D+i.

Personal recomendado para la tipología

El personal encargado de la infraestructura física en proyectos de I+D+i en hidrógeno verde cumple funciones esenciales de soporte, aunque no requiera una alta especialización técnica en la operación de equipos de la cadena de valor. Su principal responsabilidad es mantener en condiciones óptimas los espacios físicos como laboratorios, plantas piloto y zonas de pruebas. Si bien su labor diaria puede ser operativa o logística, durante la etapa de diseño y habilitación es clave que este personal tenga conocimientos en normativas de seguridad, especialmente el Decreto Supremo N°13/2022 y la norma NFPA 2, para asegurar instalaciones seguras y compatibles con hidrógeno, contando idealmente con licencia de instalador de gas clase 5 emitida por la SEC. Este personal permite que las actividades científicas o formativas puedan desarrollarse de forma segura y continua.

5.4.1.2 Infraestructura eléctrica e insumos

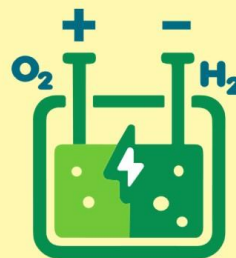


5.4.1.3 Producción de hidrógeno verde



Producción de hidrógeno verde

La producción de hidrógeno verde abarca los equipos y sistemas destinados a generar hidrógeno, principalmente mediante procesos de electrólisis del agua. Se consideran distintos tipos de electrolizadores y sus sistemas complementarios, como fuentes de energía, enfriamiento y control. Esta infraestructura permite realizar investigación aplicada tanto en los procesos de producción que utilizan electrolizadores como en el funcionamiento interno de los propios equipos, incluyendo el desarrollo de modificaciones operativas y el estudio de materiales asociados a la electrólisis.



Ubicación de la tipología

Ubicación recomendada:
Regiones Hub de hidrógeno:
-Región de Antofagasta
-Región de Valparaíso
-Región Metropolitana
-Región del Biobío
-Región de Magallanes



Equipamiento

Equipamiento principal

- Electrolizadores PEM
- Electrolizadores alcalinos
- Electrolizadores AEM
- Electrolizadores de óxido sólido
- Fotocatálisis o fotoelectrólisis
- Otras tecnologías

Equipamiento complementario

- Sistemas de regulación y control
 - Controladores de presión y temperatura
 - PLCs y software SCADA para monitoreo
 - Válvulas automáticas y sensores de caudal
- Gestión térmica
 - Intercambiadores de calor
 - Enfriadores de proceso (chillers)
 - Calentadores eléctricos industriales
 - Aislamiento térmico de líneas y equipos
- Gestión de agua en el sistema
 - Tanques de alimentación
 - Bombas de agua

Características recomendadas

Esta configuración recomendada para electrolizadores se basa en el equipamiento identificado con mayor frecuencia en los centros de I+D+i participantes del estudio. No obstante, sus características principales dependerán de los objetivos específicos de cada investigación, por lo que esta propuesta debe entenderse solo como una recomendación general.

Tipo	PEM
Producción de hidrógeno verde	0,05 - 10 kgH ₂ /día
Pureza de hidrógeno producido	99,999%
Presión de salida	15 - 40 bar
Temperatura de operación	50 - 80 °C

Personal recomendado para la tipología

Debe asegurar la operación segura, continua y eficiente de los equipos de producción de hidrógeno verde mediante electrólisis, considerando tanto el control del proceso como el cumplimiento de estándares técnicos y normativos.

Conocimientos requeridos:

- Principios de electrólisis y funcionamiento de electrolizadores (PEM, alcalinos, otros).
- Variables operativas críticas: presión, temperatura, caudal, pureza.
- Equipos auxiliares: fuentes de poder, sistemas de refrigeración, sensores y controladores.
- Seguridad industrial basada en D.S. N°13/2022 y normas internacionales.
- Fundamentos en energías renovables y compatibilidad con sistemas eléctricos.

Principales tareas:

- Operar y monitorear el sistema de electrólisis según parámetros técnicos.
- Registrar y analizar datos operativos del proceso de producción.
- Ejecutar respuestas ante desviaciones del proceso y aplicar protocolos de seguridad.
- Coordinar con el equipo de mantenimiento preventivo y correctivo.

Perfil propuesto:

Técnico de nivel superior en electricidad, mecánica o procesos industriales, con formación en operación de plantas y conocimientos en seguridad en ambientes con hidrógeno.

*Ubicación recomendada basada en actividades de las macrozonas.

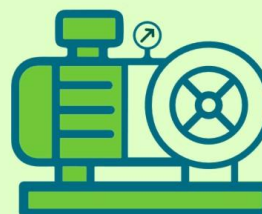
*Este perfil se vincula funcionalmente con los perfiles ChileValora de supervisor/a, operador/a y técnico/a de mantenimiento en planta de hidrógeno.

5.4.1.4 Acondicionamiento de hidrógeno verde y derivados



Acondicionamiento de hidrógeno verde y derivados

El acondicionamiento es una etapa clave en la cadena de valor del hidrógeno verde, ya que permite ajustar el gas a las condiciones necesarias para su uso, almacenamiento o transformación. Desde la perspectiva de I+D+i, esta etapa habilita el desarrollo de soluciones tecnológicas para optimizar el rendimiento de procesos posteriores, validar estándares de calidad, diseñar estrategias de control y simular condiciones operativas reales. Se presentan las tipologías de equipamiento asociadas al acondicionamiento, su configuración recomendada y el perfil del personal requerido para el acondicionamiento tanto de hidrógeno verde como de sus derivados.



Ubicación de la tipología

Ubicación recomendada:
Regiones Hub de hidrógeno:
-Región de Antofagasta
-Región de Valparaíso
-Región Metropolitana
-Región del Biobío
-Región de Magallanes



Equipamiento

Equipamiento principal

- Compresores
 - Compresores de pistón
 - Compresores de diafragma
 - Compresores de tornillo
 - Compresores sin aceite para aplicaciones de alta pureza
- Boosters
- Secadores de hidrógeno
 - Secadores por adsorción
 - Secadores por membrana
 - Sistemas de regeneración de calor para adsorbentes
- Válvulas de control de presión
- Sistemas de regulación de temperatura para hidrógeno y derivados
 - Intercambiadores de calor para ajuste de temperatura
 - Enfriadores de línea
 - Calentadores de gas para evitar condensación
- Otros equipos de acondicionamiento

Equipamiento complementario

- Instrumentación de monitoreo
- Control y sistemas de automatización

Características recomendadas

Esta configuración recomendada para equipos de acondicionamiento de hidrógeno se fundamenta en los dispositivos identificados con mayor recurrencia en los centros de I+D+i participantes del estudio. Sin embargo, sus especificaciones dependerán de los objetivos técnicos de cada proyecto, tales como el nivel de pureza requerido, la presión de salida o las condiciones térmicas del gas. Por tanto, esta propuesta debe entenderse como una orientación general para escenarios formativos o experimentales de referencia.

Tipo	Compresor/Booster
Presión de trabajo	150 - 400 bar
Temperatura de operación	20 °C

Personal recomendado para la tipología

Debe asegurar el tratamiento adecuado del hidrógeno producido, mediante su compresión, secado, regulación de presión y control de temperatura, con el fin de cumplir las condiciones requeridas para su almacenamiento, transporte o uso.

Conocimientos requeridos:

- Funcionamiento de compresores, secadores y válvulas reguladoras.
- Control de temperatura y monitoreo de variables críticas en sistemas presurizados.
- Procedimientos de operación segura en instalaciones de gases industriales.
- Normativa de seguridad aplicable D.S. N°13/2022 y normas internacionales.

Principales tareas:

- Operar y monitorear sistemas de acondicionamiento de hidrógeno.
- Realizar inspecciones preventivas y ajustes de presión, temperatura y humedad.
- Registrar datos de operación y reportar desviaciones en condiciones críticas.
- Aplicar protocolos de seguridad industrial y responder ante fallos operativos.
- Apoyar ensayos de investigación en condiciones específicas de acondicionamiento.

Perfil propuesto:

Técnico de nivel medio o superior en mecánica, química industrial o automatización, con experiencia en el manejo de gases comprimidos y operación de sistemas térmicos y de presión.

*Ubicación recomendada basada en actividades de las macrozonas.

*Este perfil se vincula funcionalmente con los perfiles ChileValora de supervisor/a, operador/a y técnico/a de mantenimiento en planta de hidrógeno.

5.4.1.5 Almacenamiento de hidrógeno verde y derivados



Almacenamiento de hidrógeno verde y derivados

Ubicación de la tipología

Ubicación recomendada:
Regiones con foco industrial:
-Región de Antofagasta
-Región del Biobío
-Región de Magallanes

Equipamiento

Equipamiento principal

- Tanques de almacenamiento de hidrógeno gaseoso
- Tanques criogénicos
- Portadores de hidrógeno orgánico líquido
- Sistemas de almacenamiento en estado sólido:
 - Basados en hidruros metálicos
 - Absorción en materiales porosos
- Tanques para almacenamiento de derivados del hidrógeno:
 - Contenedores presurizados para amoníaco, metanol u otros derivados
 - Tanques de doble contención para sustancias peligrosas o combustibles
- Otros tipos de almacenamiento par H₂ y derivados

Equipamiento complementario

- Sistemas de monitoreo y control
- Sistemas de inertización y ventilación
 - Inertización con nitrógeno para tanques de derivados reactivos
 - Sistemas de ventilación forzada en salas de almacenamiento cerradas
- Sistemas térmicos asociados

Características recomendadas

Esta configuración recomendada para sistemas de almacenamiento de hidrógeno y sus derivados se enfoca en estanques de gas comprimido de tipo III o IV, dado que fueron los tipos de equipos más recurrentemente identificados en los centros de I+D+i durante el levantamiento de información. Si bien esta propuesta refleja una configuración común, las características específicas deberán definirse en función de los objetivos particulares de cada proyecto, por lo que debe entenderse como una guía referencial adaptable.

Tipo de almacenamiento	Gas presurizado
Tipo de estanque	Tipo III o IV
Presión de trabajo	150 - 400 bar



Personal recomendado para la tipología

Debe supervisar y ejecutar las operaciones asociadas al almacenamiento seguro de hidrógeno verde, ya sea en forma comprimida, líquida o en materiales de almacenamiento sólido.

Conocimientos requeridos:

- Tipos de almacenamiento de hidrógeno: compresión, licuefacción, hidruros metálicos.
- Funcionamiento de estanques tipo I, II, III y IV, y sus requerimientos técnicos.
- Manejo de sistemas de monitoreo de presión, temperatura y fugas.
- Normativas de seguridad asociadas al almacenamiento de gases inflamables y D.S. N°13/2022.
- Procedimientos de respuesta ante emergencias y gestión de riesgos.

Principales tareas:

- Operar y mantener los sistemas de almacenamiento de hidrógeno y/o derivados.
- Verificar condiciones de presión y temperatura en tanques y sistemas de seguridad.
- Realizar controles periódicos para detectar posibles fugas o degradación del sistema.
- Colaborar con investigadores en la preparación de pruebas que requieran condiciones específicas de almacenamiento.

Perfil propuesto:

Técnico de nivel medio o superior en mecánica industrial, instrumentación o procesos químicos, con experiencia en operación de estanques presurizados y normativas de seguridad para gases.

*Ubicación recomendada basada en actividades de las macrozonas.

*Este perfil se vincula funcionalmente con los perfiles ChileValora de supervisor/a, operador/a y técnico/a de mantenimiento en planta de hidrógeno.

5.4.1.6 Instrumentación para hidrógeno verde y derivados



Instrumentación de hidrógeno verde y derivados

La instrumentación especializada de hidrógeno verde y derivados incluye tecnologías orientadas a la caracterización de materiales, control de calidad del hidrógeno, análisis de pureza, composición de mezclas, monitoreo de procesos, entre otros, todos ellos fundamentales para asegurar resultados reproducibles y confiables en entornos de investigación. Además, la instrumentación cumple un rol fundamental en el control de procesos y se destaca su importancia en la seguridad de las instalaciones, ya que permite detectar condiciones anómalas, prevenir fugas y activar sistemas de respuesta ante emergencias.



Ubicación de la tipología

Ubicación recomendada:
Regiones Hub de hidrógeno
-Región de Antofagasta
-Región de Valparaíso
-Región Metropolitana
-Región del Biobío
-Región de Magallanes



Equipamiento

Equipamiento principal

- Cromatografía
 - Cromatógrafos de gases para análisis de pureza de hidrógeno
 - Cromatógrafos de líquidos para análisis de derivados
- Espectroscopía
- Sensores y analizadores específicos
- Instrumentos de medición de parámetros físicos
 - Medidores de presión
 - Medidores de caudal másico o volumétrico
 - Medidores de temperatura
- Otros instrumentos

Equipamiento complementario

- Sistemas de preparación de muestras
 - Sistemas de dilución y acondicionamiento de gases
- Sistemas de control y procesamiento de datos
 - Software de adquisición y análisis químico especializado
- Estándares de calibración

Características recomendadas

La instrumentación destinada a proyectos de investigación, desarrollo e innovación en torno al hidrógeno verde y sus derivados abarca un espectro técnico muy amplio, que va desde sensores básicos hasta sistemas analíticos complejos de alta precisión. Al momento de seleccionar los instrumentos apropiados, es fundamental considerar no solo los requerimientos asociados al control de procesos y la toma de datos experimentales, sino también su rol crítico en la seguridad operativa de los sistemas. Variables como la presión, temperatura, caudal, humedad, composición de gases, presencia de fugas o concentraciones de hidrógeno deben ser monitoreadas de manera continua y fiable para evitar condiciones de riesgo y asegurar la calidad de los resultados. Dado que los proyectos pueden tener objetivos muy diversos, las características específicas de los instrumentos deben ser definidas en función de los requerimientos investigativos de cada caso.

Personal recomendado para la tipología

Debe supervisar, operar y mantener los sistemas de medición, monitoreo y control instalados en laboratorios, plantas piloto o bancos de prueba asociados al desarrollo del hidrógeno verde y sus derivados.

Conocimientos requeridos:

- Principios de medición de variables críticas: presión, temperatura, caudal, concentración de gases.
- Funcionamiento y calibración de sensores.
- Sistemas de adquisición de datos DAQ, PLCs y SCADA aplicados al monitoreo continuo.
- Protocolos de seguridad basado en D.S. N°13/2022 y normas internacionales
- Nociones de mantenimiento predictivo y correctivo para sistemas de control y sensores.

Principales tareas:

- Configurar y calibrar sensores y sistemas de monitoreo en condiciones de laboratorio o planta.
- Registrar y respaldar datos de variables críticas para su análisis por equipos de I+D.
- Colaborar con investigadores y técnicos para optimizar la precisión de los procesos monitoreados.
- Detectar anomalías y ejecutar acciones correctivas frente a desviaciones operacionales.
- Apoyar la integración de nuevos equipos de medición o automatización.

Perfil propuesto:

Técnico de nivel superior en instrumentación, automatización, control de procesos o carreras afines. Se valorará experiencia previa en entornos experimentales, plantas piloto o laboratorios.

*Ubicación recomendada basada en actividades de las macrozonas.

*Este perfil se vincula funcionalmente con los perfiles ChileValora de supervisor/a, operador/a y técnico/a de mantenimiento en planta de hidrógeno.

5.4.1.7 Producción de derivados de hidrógeno verde



Producción de derivados de hidrógeno verde

La producción de derivados del hidrógeno verde, tales como el metanol sintético, el amoníaco verde, e-combustibles y otros portadores energéticos, constituye una fase estratégica dentro de la cadena de valor, ya que permite ampliar las aplicaciones del hidrógeno, facilitar su transporte y almacenamiento, y generar productos de alto valor añadido con usos industriales, energéticos o logísticos. Esta etapa requiere procesos químicos complejos y condiciones controladas de operación, por lo que su desarrollo en el ámbito de I+D+i es fundamental para optimizar la eficiencia, reducir costos y mejorar la sostenibilidad de las rutas tecnológicas empleadas.



Ubicación de la tipología

Ubicación recomendada:
Regiones Hub de hidrógeno:
-Región de Antofagasta
-Región de Valparaíso
-Región Metropolitana
-Región del Biobío
-Región de Magallanes



Equipamiento

Equipamiento principal

- Reactores Químicos
 - Reactores de síntesis de amoníaco
 - Reactores de metanación
 - Reactores de metanol a partir de H_2 y CO_2
 - Reactores tipo MTG Methanol-to-Gasoline
- Plantas piloto de Power-to-X
 - Unidades de producción de combustibles sintéticos e-fuels
- Captura y alimentación de CO_2
- Otras tecnologías para producción de derivados de hidrógeno

Equipamiento complementario

- Sistemas de purificación
 - Unidades de separación y purificación de productos
- Sistemas de control de procesos
 - Software de control de reacción en tiempo real
- Análisis de productos
- Sistemas auxiliares

Características recomendadas

Los reactores químicos empleados en proyectos de investigación, desarrollo e innovación relacionados con derivados de hidrógeno verde son elementos clave para la validación de rutas tecnológicas de síntesis, transformación y valorización del hidrógeno como insumo. Estos reactores pueden adoptar configuraciones muy diversas según el tipo de derivado que se busque obtener, como metanol, amoníaco, combustibles sintéticos u otros, y sus características deben ser seleccionadas cuidadosamente en función de las condiciones de operación requeridas.

La selección de un reactor para fines de I+D+i debe considerar tanto su versatilidad experimental como la seguridad en su operación. Dado el amplio rango de procesos posibles, no existe una única configuración recomendada. La elección del reactor, su volumen, tipo de lecho, materiales de construcción y sistemas auxiliares deberá responder a los objetivos específicos del proyecto, con miras a generar datos confiables, facilitar el escalamiento y validar nuevos caminos tecnológicos para la producción de derivados del hidrógeno verde.

Personal recomendado para la tipología

Debe asegurar la operación segura, eficiente y controlada de los sistemas destinados a la producción de derivados de hidrógeno verde, como metanol, amoníaco u otros combustibles sintéticos.

Conocimientos requeridos:

- Fundamentos de química de procesos y termodinámica aplicada.
- Manejo de reactores químicos y catalizadores.
- Control de variables críticas.
- Instrumentación asociada a monitoreo de reacciones y toma de datos experimentales.
- Normativa y protocolos de seguridad industrial, D.S. N°13/2022 y normas internacionales.

Principales tareas:

- Operar sistemas de producción de derivados bajo condiciones controladas.
- Registrar datos experimentales y colaborar en el análisis de resultados con investigadores.
- Realizar puesta en marcha, limpieza y purga de reactores según protocolos definidos.
- Apoyar ajustes de operación y pruebas de nuevos esquemas de síntesis.
- Aplicar procedimientos de emergencia y mantenimiento básico de equipos.

Perfil propuesto:

Técnico/a de nivel superior en química industrial, procesos químicos o ingeniería química, con experiencia en operación de reactores de síntesis o plantas piloto.

*Ubicación recomendada basada en actividades de las macrozonas.

*Este perfil se vincula funcionalmente con los perfiles ChileValora de supervisor/a, operador/a y técnico/a de mantenimiento en planta de hidrógeno.

5.4.1.8 Transporte y distribución de hidrógeno verde y derivados



5.4.1.9 Consumo de hidrógeno verde y derivados para generación de calor



Consumo para generación de calor o combustión

El consumo para generación de calor permite validar tecnologías de combustión limpia, explorar nuevos diseños de quemadores o calderas adaptados a mezclas con hidrógeno, y ensayar la compatibilidad con equipos térmicos existentes o prototipos innovadores. Desde el punto de vista investigativo, esta área permite el desarrollo de estudios aplicados sobre eficiencia térmica, emisiones, estabilidad de llama, comportamiento de materiales, entre otros. Además, proporciona un espacio ideal para experimentación con blending de combustibles, y adaptación de equipos industriales convencionales al uso de hidrógeno como combustible.

Ubicación de la tipología

Ubicación recomendada:
Regiones Hub de hidrógeno:
-Región de Antofagasta
-Región de Valparaíso
-Región Metropolitana
-Región del Biobío
-Región de Magallanes



Equipamiento

Equipamiento principal

- Quemadores experimentales
 - Quemadores atmosféricos y presurizados para pruebas con hidrógeno puro, mezclas y combustibles sintéticos
- Sistemas de combustión para laboratorio
 - Cámaras térmicas de laboratorio, hornos o túneles térmicos con inyección controlada de gases
- Calderas experimentales
- Sistemas de mezcla o blending
- Motores de combustión interna
- Sistemas de control de combustión
- Otros equipos para generación de calor

Equipamiento complementario

- Instrumentación de medición y monitoreo
- Sistemas de alimentación de H₂ y derivados
- Dispositivos de seguridad
- Software de simulación y análisis

Características recomendadas

La configuración recomendada dependerá del tipo de equipo térmico empleado, del derivado utilizado, hidrógeno puro, mezclas con gas natural, e-metanol, entre otros y de los parámetros que se deseen investigar. Es fundamental considerar sistemas modulares que permitan ajustes en caudales, presión, mezcla de gases y ventilación, así como una adecuada instrumentación para la medición de temperatura, composición de gases de combustión y seguridad.

Se sugiere optar por soluciones que ofrezcan flexibilidad para ensayos experimentales, alta precisión en el control de variables térmicas y que estén alineadas con normativas de seguridad aplicables, de modo que los resultados obtenidos sean relevantes tanto para validación científica como para futuras aplicaciones industriales.

Potencia	5 - 100 kW térmicos
-----------------	--

Personal recomendado para la tipología

Ejecutar la operación y monitoreo seguro de equipos de combustión que utilizan hidrógeno verde o sus derivados para generación de calor, en contextos experimentales o de validación tecnológica.

Conocimientos requeridos:

- Fundamentos de combustión de gases y mezclas con hidrógeno.
- Operación de quemadores, calderas u hornos adaptados a H₂ o derivados.
- Manejo de mezclas gaseosas y líneas de alimentación presurizadas.
- Instrumentación básica para medición de temperatura, presión y composición de gases.
- Protocolos de seguridad para manipulación de hidrógeno según D.S. N°13/2022 y normas internacionales.

Principales tareas:

- Operar quemadores, sistemas de encendido y control de combustión.
- Supervisar variables operativas durante los ensayos (temperatura, caudal, mezcla).
- Aplicar procedimientos de seguridad antes, durante y después de cada prueba.
- Colaborar en el mantenimiento básico de los sistemas térmicos y su calibración.

Perfil propuesto:
Técnico de nivel medio o superior en áreas como mecánica industrial, procesos térmicos o energías, con formación complementaria en seguridad de gases combustibles.

*Ubicación recomendada basada en actividades de las macrozonas.

*Este perfil se vincula funcionalmente con los perfiles ChileValora de supervisor/a, operador/a y técnico/a de mantenimiento en planta de hidrógeno.

5.4.1.10 Consumo de hidrógeno verde y derivados para generación eléctrica



Consumo para generación eléctrica

Representa una de las aplicaciones finales más relevantes dentro del ecosistema de investigación, desarrollo e innovación. Esta línea permite validar el funcionamiento de tecnologías como celdas de combustible, microturbinas y motores adaptados para la conversión directa de estos vectores energéticos en electricidad, evaluando su eficiencia, estabilidad operativa y adaptabilidad a distintas escalas.

Este tipo de equipamiento habilita ensayos controlados orientados tanto a la mejora de componentes como al análisis del desempeño integral de sistemas eléctricos alimentados por hidrógeno o derivados.



Ubicación de la tipología

Ubicación recomendada:
Regiones Hub de hidrógeno:
-Región de Antofagasta
-Región de Valparaíso
-Región Metropolitana
-Región del Biobío
-Región de Magallanes



Equipamiento

Equipamiento principal

- Celdas de combustible
- Turbinas a gas adaptadas a hidrógeno o derivados
 - Equipos de microturbinas para ensayo de combustión directa de hidrógeno o e-combustibles.
 - Acoplamiento a generadores eléctricos y medidores de rendimiento energético.
- Generadores térmicos híbridos
- Sistemas de electrólisis reversibles
- Motores eléctricos alimentados por hidrógeno a través de celdas

Equipamiento complementario

- Sistemas de alimentación de gas
- Sistemas de carga eléctrica y almacenamiento
- Equipos de monitoreo eléctrico
- Sistemas de gestión térmica
- Equipamiento de seguridad
- Software de simulación y análisis

Características recomendadas

La configuración recomendada para el consumo de hidrógeno verde y sus derivados en generación eléctrica dependerá del tipo de equipo electroenergético utilizado, del vector energético empleado y de los objetivos específicos de la investigación. Es esencial considerar configuraciones modulares que permitan realizar ajustes en variables como potencia eléctrica, presión, caudal y temperatura de operación, así como sistemas de monitoreo que permitan la evaluación continua del rendimiento eléctrico y de la eficiencia energética.

También se recomienda priorizar equipos que permitan ensayos con distintos modos de operación y que incorporen protocolos de seguridad compatibles con la manipulación de gases energéticos.

Potencia	0,5 - 50 kW eléctricos
-----------------	---

Personal recomendado para la tipología

Asegurar la operación eficiente, segura y controlada de sistemas de generación eléctrica basados en hidrógeno verde y sus derivados, tales como celdas de combustible, microturbinas o motores adaptados.

Conocimientos requeridos:

- Funcionamiento de celdas de combustible, microturbinas y generadores híbridos.
- Instrumentación para medición de variables eléctricas y térmicas.
- Seguridad en sistemas con gases combustibles basado en D.S. N°13/2022 y normas internacionales.
- Protocolos de arranque, operación y parada de equipos energéticos experimentales.

Principales tareas:

- Operar y supervisar el funcionamiento de equipos de generación eléctrica.
- Monitorear y registrar variables clave para el análisis de desempeño.
- Ejecutar protocolos de seguridad en cada fase del proceso.
- Colaborar con investigadores en la configuración de pruebas y adaptación de parámetros.
- Apoyar tareas básicas de mantenimiento preventivo y correctivo.

Perfil propuesto:

Técnico nivel superior en electricidad, electrónica, automatización o energías renovables, con experiencia en operación de sistemas de generación eléctrica o plantas piloto.

*Ubicación recomendada basada en actividades de las macrozonas.

*Este perfil se vincula funcionalmente con los perfiles ChileValora de supervisor/a, operador/a y técnico/a de mantenimiento en planta de hidrógeno.

5.4.1.11 Escalamiento de la infraestructura

Una vez priorizadas las tipologías de equipamiento científico, tecnológico y técnico en función de su relevancia para el corto y mediano plazo, los resultados del estudio permiten identificar un concepto transversal que emerge con fuerza, que es la necesidad de escalamiento. Si bien las capacidades actuales se concentran principalmente en equipamiento de laboratorio y prototipos en pequeña escala, diversos actores consultados, tanto en entrevistas como en talleres y visitas de terreno, coinciden en que, para que la I+D+i en hidrógeno verde transite hacia aplicaciones reales, es imprescindible contar con infraestructura y equipamiento que permita validar tecnologías en condiciones cercanas a su operación industrial.

Este escalamiento no implica únicamente aumentar la capacidad de los equipos, sino también crear entornos experimentales integrados, donde puedan probarse procesos completos, analizarse rendimientos, madurar tecnologías y generar evidencia robusta para certificaciones y decisiones de inversión. La falta de espacios habilitados para estas etapas limita la capacidad del ecosistema para cerrar el ciclo de innovación, restringiendo la transferencia efectiva hacia la industria.

Por ello, más allá de la priorización específica de cada tipología, el estudio propone incorporar el escalamiento como una dimensión estratégica en el desarrollo de futuras políticas de financiamiento, planificación territorial y diseño de infraestructura colaborativa para el hidrógeno verde en Chile. Este enfoque alude a la ampliación progresiva de la capacidad de planta de la infraestructura destinada a investigación, desarrollo e innovación, especialmente aquella vinculada a la red nacional de colaboración. Resulta fundamental que estas instalaciones puedan incrementar sus capacidades de generación eléctrica renovable para la producción de hidrógeno y sus derivados, aumentar su capacidad de almacenamiento para lograr mayor autonomía en las actividades de I+D+i, y fortalecer sus capacidades de consumo energético en aplicaciones finales, como reconversión de procesos, generación térmica o generación eléctrica. En este contexto, cada institución deberá determinar qué eslabón de la cadena de valor del hidrógeno resulta más pertinente escalar, de manera que la infraestructura de I+D+i nacional evolucione hacia entornos experimentales que reproduzcan condiciones operacionales cada vez más próximas a las de la industria.

5.4.2 Tipología de equipamiento técnico para proyectos relacionados con hidrógeno verde y sus derivados

- Para más información revisar el capítulo 10.4.2 del informe completo.

Esta sección presenta cuatro tipologías de equipamiento técnico orientadas específicamente al entrenamiento práctico de capital humano en hidrógeno verde y sus derivados, a través del diseño e implementación de bancos de pruebas con fines formativos. Estas tipologías están enfocadas en facilitar la adquisición de competencias operativas, de mantenimiento, simulación y respuesta ante emergencias, esenciales para la implementación segura y eficiente de tecnologías asociadas a la cadena de valor del hidrógeno.

Para cada tipología se describe el tipo de formación que habilita, las especificaciones técnicas requeridas, incluyendo los equipos principales y complementarios, el perfil del personal que se requiere para su operación y mantenimiento, y las características del público objetivo al que se destina cada banco de pruebas. Asimismo, se propone una orientación territorial estratégica para su instalación en distintas macrozonas del país. Por otra parte, también se realizó una estimación de costos y viabilidad económica asociada a estas tipologías, la cual se desarrolla en el *Capítulo 6* de este documento, y en el *Capítulo 11* del informe completo.

Estas propuestas se construyen sobre la base del levantamiento de información realizado a lo largo del estudio, que incluyó entrevistas con expertos, encuestas a instituciones formativas y tecnológicas, visitas a terreno y una revisión bibliográfica especializada. Además, las necesidades que estas tipologías buscan abordar fueron validadas en los talleres regionales y en la instancia virtual, permitiendo incorporar una mirada transversal del ecosistema nacional de formación técnica vinculada al hidrógeno.

A continuación, se presentan las tipologías propuestas para el equipamiento técnico o bancos de pruebas destinados a formación de personal.

5.4.2.1 Banco de pruebas para la operación integral de sistemas de hidrógeno verde y derivados



Banco de pruebas para operación integral de sistemas de hidrógeno verde y derivados

Permite simular, en condiciones controladas, la operación integrada de un sistema de hidrógeno verde desde su producción hasta su aplicación final. Su diseño permite entrenar al personal técnico en la comprensión y gestión de interacciones entre los distintos subsistemas: generación eléctrica renovable, producción de hidrógeno, acondicionamiento, almacenamiento, conversión a derivados y consumo en diversas aplicaciones.

Está pensado como una plataforma formativa transversal que favorece el aprendizaje sistemático, permitiendo además el ensayo de fallas operacionales, respuesta ante eventos y procedimientos de arranque y parada.



Ubicación de la tipología

Ubicación recomendada:

Regiones Hub de hidrógeno:

- Región de Antofagasta
- Región de Valparaíso
- Región Metropolitana
- Región del Biobío
- Región de Magallanes



Equipamiento mínimo recomendado

- **Infraestructura física** con condiciones de seguridad adecuadas
- **Infraestructura eléctrica** o simulador de fuente renovable
- **Equipamiento para Producción** de hidrógeno o derivados
- **Equipamiento de Acondicionamiento** para hidrógeno o derivados
- **Equipamiento para Almacenamiento** de hidrógeno o derivados
- **Equipamiento para distribución** de hidrógeno o derivados
- **Aplicación de consumo** (celda de combustible, quemador de baja escala, sistema de mezcla GN-H₂)
- Sistemas de control mediante **instrumentación**

Personal recomendado para la tipología

Ejecutar y supervisar la operación integrada de los distintos sistemas que conforman un banco de pruebas orientado a simular condiciones reales de producción, acondicionamiento, almacenamiento y consumo de hidrógeno verde y sus derivados. Se recomienda que el equipo humano de esta tipología cuente con al menos un instalados SEC clase 5.

Conocimientos requeridos:

- Principios de operación de electrolizadores, compresores, estanques de almacenamiento, celdas de combustible y quemadores.
- Conocimientos básicos de instrumentación, control de procesos y variables críticas.
- Protocolos de seguridad para el manejo de hidrógeno y sus derivados alineados con el D.S. N°13/2022 y normas internacionales.
- Procedimientos de arranque, operación y parada de bancos de pruebas de ciclo completo.

Principales tareas:

- Operar coordinadamente los distintos subsistemas del banco de pruebas.
- Monitorear condiciones de proceso y registrar datos operativos clave.
- Aplicar protocolos de emergencia y seguridad ante desviaciones de parámetros críticos.
- Apoyar el mantenimiento preventivo y la calibración básica de equipos.
- Colaborar con investigadores y supervisores en pruebas de validación y documentación técnica.

Perfil propuesto:

Técnico de nivel superior en automatización, mecatrónica, química industrial o energías renovables, con formación en operación de sistemas industriales y experiencia en entornos piloto o formativos.

Perfil del personal en formación:

- Técnicos y profesionales del área de energías renovables, electricidad, mecánica o química
- Personal en proceso de certificación o formación para operación de sistemas de hidrógeno
- Operadores de plantas piloto, instalaciones demostrativas o centros de I+D+i

*Ubicación recomendada basada en actividades de las macrozonas.

*Este perfil se vincula funcionalmente con los perfiles ChileValora de supervisor/a, operador/a y técnico/a de mantenimiento en planta de hidrógeno.

5.4.2.2 Banco de pruebas para mantenimiento de equipos clave de hidrógeno verde y derivados



Banco de pruebas para mantenimiento de equipos clave de hidrógeno verde y derivados

Está orientado al desarrollo de competencias en mantenimiento preventivo, correctivo y predictivo de equipos fundamentales en la cadena de valor del hidrógeno verde y sus derivados. Permite practicar, en entornos controlados, procedimientos seguros de desarme, inspección, limpieza, reemplazo de piezas, diagnóstico de fallas y puesta en marcha, ya sea sobre equipos reales o réplicas funcionales. Su implementación resulta clave para preparar técnicos con habilidades prácticas que aseguren la disponibilidad operativa de los sistemas, reduzcan tiempos de detención y extiendan la vida útil de activos.



Ubicación de la tipología

Ubicación recomendada:
Regiones Hub de hidrógeno:
-Región de Antofagasta
-Región de Valparaíso
-Región Metropolitana
-Región del Biobío
-Región de Magallanes



Equipamiento mínimo recomendado

- **Infraestructura física** con condiciones de seguridad adecuadas
- **Infraestructura eléctrica** o simulador de fuente renovable
- **Equipamiento para Producción** de hidrógeno o derivados
- **Equipamiento de Acondicionamiento** para hidrógeno o derivados
- **Equipamiento para Almacenamiento** de hidrógeno o derivados
- **Equipamiento para distribución** de hidrógeno o derivados
- **Aplicación de consumo** (celda de combustible, quemador de baja escala, sistema de mezcla GN-H₂)
- Sistemas de control mediante **instrumentación**

Personal recomendado para la tipología

Ejecutar labores de diagnóstico, mantenimiento preventivo, correctivo y, cuando corresponda, predictivo, sobre equipos esenciales utilizados en las distintas etapas de la cadena de valor del hidrógeno verde. Este banco de pruebas busca replicar escenarios reales o simulados que permitan a los técnicos adquirir experiencia práctica en condiciones controladas y seguras. Se recomienda que el equipo humano de esta tipología cuente con al menos un instalados SEC clase 5.

Conocimientos requeridos:

- Funcionamiento mecánico y eléctrico de equipos como electrolizadores, compresores, válvulas, estanques de almacenamiento y sistemas de secado.
- Fundamentos de seguridad industrial, según el D.S. N°13/2022 y normas internacionales.
- Técnicas de inspección, detección de fallas, desmontaje, calibración y reemplazo de componentes.
- Lectura e interpretación de manuales técnicos, planos mecánicos y eléctricos.
- Procedimientos para pruebas de funcionalidad post-mantenimiento y puesta en marcha de equipos.

Principales tareas:

- Realizar actividades formativas demostrativas para instruir a las personas que están siendo entrenadas.
- Realizar mantenimiento preventivo y correctivo sobre los distintos equipos del banco, siguiendo protocolos técnicos.
- Coordinar tareas con operadores, supervisores y formadores para asegurar un entorno seguro y funcional.

Perfil propuesto:

Técnico/a de nivel medio o superior en mantenimiento industrial, electromecánica, automatización o tecnologías energéticas, con conocimientos prácticos en equipos de generación, acondicionamiento o almacenamiento de hidrógeno.

Perfil del personal en formación:

- Técnicos y profesionales del área de energías renovables, electricidad, mecánica o química
- Personal en proceso de certificación o formación para operación de sistemas de hidrógeno
- Operadores de plantas piloto, instalaciones demostrativas o centros de I+D+i

*Ubicación recomendada basada en actividades de las macrozonas.

*Este perfil se vincula funcionalmente con los perfiles ChileValora de supervisor/a, operador/a y técnico/a de mantenimiento en planta de hidrógeno.

5.4.2.3 Banco de pruebas para simulación y control de sistemas de hidrógeno verde y derivados



Banco de pruebas para simulación y control de sistemas de hidrógeno verde y derivados

Orientados al desarrollo de competencias en simulación de procesos, control automatizado y monitoreo de variables críticas en sistemas vinculados al hidrógeno verde y sus derivados. Su propósito es formar personal capacitado para comprender, operar y optimizar sistemas de control asociados a la producción, acondicionamiento, almacenamiento y uso del hidrógeno en entornos reales o virtuales.

Este tipo de banco resulta especialmente relevante para entrenar en aspectos como el control digital de procesos industriales simulados, y uso de software especializado.



Ubicación de la tipología

Ubicación recomendada:
Regiones Hub de hidrógeno:
-Región de Antofagasta
-Región de Valparaíso
-Región Metropolitana
-Región del Biobío
-Región de Magallanes



Equipamiento mínimo recomendado

- **Infraestructura física** con condiciones de seguridad adecuadas
- **Infraestructura eléctrica**
- **Instrumentación** enfocada a la simulación de contextos reales mediante el uso de hardware y software.

Personal recomendado para la tipología

Diseñar, operar y mantener entornos de simulación y control asociados a procesos clave de la cadena de valor del hidrógeno verde y sus derivados. Este perfil está enfocado en el entrenamiento de personal mediante plataformas digitales, asegurando la correcta representación de variables críticas y el funcionamiento de sistemas automatizados bajo condiciones representativas. La labor de este personal contribuye directamente al fortalecimiento de competencias técnicas en operación segura, monitoreo y optimización de procesos sin requerir equipamiento especializado.

Conocimientos requeridos:

- Fundamentos de automatización industrial y control de procesos.
- Manejo de software de simulación.
- Configuración y programación de PLCs aplicados a procesos energéticos.
- Interpretación de diagramas de flujo de procesos e instrumentación (P&ID).
- Normativas de seguridad aplicables a entornos virtuales de entrenamiento en hidrógeno D.S. N°13/2022 y estándares internacionales.

Principales tareas:

- Operar entornos de simulación que reproduzcan procesos de producción, acondicionamiento o uso de hidrógeno.
- Programar y ajustar sistemas de control para representar distintas condiciones operativas.
- Supervisar y corregir la ejecución de ejercicios de formación en control de procesos.
- Apoyar el diseño de escenarios de contingencia y respuesta en sistemas virtuales.
- Documentar resultados y sugerir mejoras en las dinámicas de entrenamiento.

Perfil propuesto:

Técnico o profesional en automatización, instrumentación, informática industrial, mecánica o ingeniería eléctrica, con experiencia en programación de sistemas de control, manejo de plataformas de simulación y conocimiento general de procesos energéticos. Debe tener competencias en entornos digitales de entrenamiento técnico y comprensión de procesos termoquímicos asociados al hidrógeno.

Perfil del personal en formación:

- Técnicos de nivel medio o superior en electricidad, automatización, electrónica, química o energías renovables.
- Estudiantes o profesionales en formación en áreas afines que requieren adquirir competencias en monitoreo y control de procesos aplicados al hidrógeno y derivados.
- Personal técnico que desea reconvertirse hacia funciones vinculadas a digitalización y control de procesos industriales seguros.

*Ubicación recomendada basada en actividades de las macrozonas.

*Este perfil se vincula funcionalmente con los perfiles ChileValora de supervisor/a, operador/a y técnico/a de mantenimiento en planta de hidrógeno.

5.4.2.4 Banco de pruebas para entrenamiento práctico en seguridad operativa



6 Costos asociados a cada tipología

- Para más información revisar el capítulo “11. Costos asociados a cada tipología” del informe completo.

Este capítulo presenta una estimación orientativa de los costos de capital (CAPEX) y operación (OPEX) asociados a las catorce tipologías de equipamiento propuestas en el marco del presente estudio. El objetivo es ofrecer un marco referencial útil para la toma de decisiones sobre inversión pública o privada en proyectos de investigación, desarrollo e innovación vinculados al hidrógeno verde y sus derivados, permitiendo comparar órdenes de magnitud y facilitar la planificación presupuestaria.

Dado que muchas de las tipologías analizadas implican equipamiento modular y de aplicación transversal, los costos operacionales no siempre pueden ser directamente atribuibles al equipamiento en sí mismo. Por ejemplo, los gastos de ingeniería, puesta en marcha o adecuaciones de obra civil no pueden ser asociados exclusivamente a una tipología como “almacenamiento de hidrógeno” o “instrumentación”. Por ello, los costos operacionales serán expresados en forma de rangos porcentuales respecto al costo total estimado del proyecto, permitiendo una mayor adaptabilidad a distintos contextos técnicos y presupuestarios.

Asimismo, las escalas de los proyectos de I+D+i revisados en este estudio varían significativamente, desde iniciativas piloto desde decenas de miles de dólares hasta proyectos más complejos, como Haru Oni, que han superado ampliamente el millón de dólares. Para efectos de homogenizar el levantamiento y análisis de costos por tipología, se ha optado por establecer como referencia un orden de magnitud cercano a los 400.000-500.000 USD, basado en experiencias reales y recientes. Entre ellas, destacan las licitaciones públicas para proyectos de demostración en las regiones de Antofagasta (Licitación [ID: 4291-8-LR25](#)) y Magallanes (Orden de compra: [5394-210-TD25](#)), ambas con configuraciones técnico-operativas comparables: plantas de producción de hidrógeno de aproximadamente 20 kW de potencia eléctrica instalada para electrólisis, abastecidas por fuentes renovables, fotovoltaica en el caso del norte y eólica en el sur. Estas referencias permiten dimensionar la inversión con base en casos concretos y actuales del ecosistema nacional.

En complemento, se han considerado como referencia proyectos demostrativos internacionales como los desarrollados por SoCalGas en Estados Unidos, además de propuestas universitarias observadas durante las visitas de campo en ese país y respuestas obtenidas en las encuestas internacionales. Todos ellos coinciden en rangos de inversión similares, permitiendo consolidar un umbral de referencia coherente y realista.

Finalmente, cabe señalar que los perfiles de personal requeridos para operar y mantener cada tipología ya han sido descritos en secciones anteriores del informe. Por tanto, este capítulo se enfocará específicamente en los aspectos económicos asociados a la adquisición y operación de equipamiento, considerando tanto las experiencias nacionales como internacionales, cotizaciones reales gestionadas por Quempin, y bases técnicas de proyectos públicos como la licitación de la Universidad de Antofagasta y el caso de la Universidad de Magallanes. Estos antecedentes proporcionan un respaldo técnico y financiero para el análisis que se presenta a continuación.

A continuación en la *Tabla N°7*, se presenta un resumen generalizado de los costos de inversión, costos de operación y costos de mantenimiento que se levantaron en el estudio. El detalle de estos valores se puede encontrar en el “Capítulo 11” del informe completo, el cual está dedicado a los costos asociados a cada una de las tipologías propuestas en el estudio.

Tabla N°1 Tabla resumen de costes aproximados y generalizados de inversión CAPEX, costes de operación OPEX y costos de mantenimiento asociados a cada una de las tipologías propuestas en el estudio.

Tipología	Costes de inversión (CAPEX) en USD	Operación (OPEX) en USD	Mantenimiento en USD
Infraestructura física	50.000 – 1.000.000+	3 – 5 % del CAPEX	Incluido en OPEX
Infraestructura eléctrica e insumos	30.000 – 500.000	3 – 5 % del CAPEX	Incluido en OPEX
Producción de hidrógeno verde	50.000 – 300.000	2 – 5 % del CAPEX	1 – 3 % del CAPEX
Acondicionamiento de hidrógeno y derivados	10.000 – 100.000	2 – 4 % del CAPEX	1 – 2 % del CAPEX
Almacenamiento de hidrógeno y derivados	15.000 – 100.000	2 – 3 % del CAPEX	1 – 2 % del CAPEX
Instrumentación y monitoreo	1.000 – 80.000	2 – 4 % del CAPEX	1 – 2 % del CAPEX
Producción de derivados de hidrógeno	100.000 – 1.500.000+	3 – 5 % del CAPEX	2 – 3 % del CAPEX
Transporte y distribución de hidrógeno y derivados	500.000 – 1.000.000+	3 – 5 % del CAPEX	Incluido en OPEX
Consumo de hidrógeno verde y derivados para generación de calor	<30.000	H ₂ gris: 216 USD/kg H ₂ verde: 420 USD/kg	1 – 3 % del CAPEX
Consumo de hidrógeno verde y derivados para generación eléctrica	<100.000	3 – 5 % del CAPEX	Incluido en OPEX
Banco de pruebas para la operación integral de sistemas de hidrógeno verde y derivados	400.000 – 500.000	<5 % del CAPEX	Incluido en OPEX
Banco de pruebas para mantenimiento de equipos clave de hidrógeno verde y derivados	400.000 – 500.000	<5 % del CAPEX	Incluido en OPEX
Banco de pruebas para simulación y control de sistemas de hidrógeno verde y derivados	400.000 – 500.000		-
Banco de pruebas para entrenamiento práctico en seguridad operativa	400.000 – 500.000	<5 % del CAPEX	Incluido en OPEX

Los rangos de precios presentados en la tabla corresponden al levantamiento de información realizado y se detallan en el Capítulo 11 del informe general. Estos valores deben considerarse como referencias aproximadas, ya que existe una amplia variedad de equipos que pueden cumplir con los requerimientos técnicos y funcionales de los diversos proyectos de I+D+i vinculados al hidrógeno verde y sus derivados.

6.1 Mecanismos de financiamiento

El financiamiento constituye un pilar esencial para el desarrollo de iniciativas de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) en hidrógeno verde, considerando su carácter altamente innovador y el elevado riesgo tecnológico asociado. Esta área se sustenta en una cadena de valor emergente que integra fuentes de energía renovable con nuevos sistemas de producción, almacenamiento y transporte de hidrógeno, así como su conversión en derivados como amoníaco o metanol verdes y su aplicación en sectores de difícil descarbonización. Todo ello se apoya en tecnologías, equipamientos y modelos de negocio en etapa de consolidación, sin referentes plenamente establecidos. A su vez, el riesgo tecnológico se explica por la limitada validación de estas soluciones en condiciones operacionales reales, la incertidumbre respecto de su desempeño y costos a gran escala, la dependencia de marcos normativos aún en desarrollo y la necesidad de inversiones significativas en infraestructura científica y tecnológica cuyo retorno es incierto.

El desarrollo de los mecanismos de financiamiento propuestos en este capítulo responde principalmente a la habilitación de infraestructura de I+D+i, la cual entregará las bases para la creación, desarrollo y consolidación de tecnologías en hidrógeno verde.

Cabe destacar que dichos desarrollos requieren financiamiento para que se permita transformar ideas en soluciones viables, escalar tecnologías, reducir la incertidumbre y atraer talento técnico y científico, entendiendo que serán proyectos de largo plazo de maduración tecnológica y bajos retornos financieros inmediatos.

Para la correcta elección de los mecanismos de financiamiento será necesario identificar:

- Quiénes solicitan el financiamiento: Empresas (con fines de lucro), Instituciones de Educación Superior (IES) y/o Instituciones Privadas sin Fines de Lucro (IPSFL).
- Para qué se requiere el financiamiento: Infraestructura basal o para proyectos específicos de I+D+i.
- La etapa de desarrollo de las tecnologías y de su comercialización: Proyectos de I+D, en diferentes niveles de TRL, proyectos comerciales desde startup o desde empresas comerciales existentes.

Una vez identificadas las características técnicas, será necesario encontrar dichos mecanismos de financiamiento. A continuación, se detallan algunos ejemplos de fondos disponibles, al año 2025, según el propósito de los mecanismos identificados. Estos fondos podrían variar en el futuro.

1. Infraestructura basal y desarrollo de tecnologías en sus primeras etapas (TRL 1 a 5)

Estos mecanismos de financiamiento corresponden al fortalecimiento de la base científica de Chile, la generación de conocimiento específico en áreas de impacto y especialidades específicas, con foco en la generación de la infraestructura habilitante para el desarrollo de actividades de I+D+i.

Principalmente aplican: Instituciones de Educación Superior (IES)

- [ANID – Centros Científicos y Tecnológicos de Excelencia con Financiamiento Basal](#)
- [FONDEF](#)
- [FONDECYT](#)
- [PIA](#), becas con componente aplicado.

- UE Horizon 2020, Casos [Green Hysland](#), [ARENHA](#), [Prometeo](#)

2. Desarrollos tecnológicos (TRL 6 a 9) y primeras aplicaciones de escalas industriales

Estos mecanismos de financiamiento buscan avanzar en la transferencia tecnológica desde la investigación para que puedan llegar al mercado, financiando desde la fase de prototipo, hasta la fase de validación técnica a escala productiva y/o validación comercial.

Principalmente aplican: Empresas, centros de investigación e Instituciones de Educación Superior (IES).

- [CORFO – Crea y Valida](#)
- [Innova Alta Tecnología](#), Prototipos de Innovación
- [Fondo de Innovación para la Competitividad](#) (Depende de cada gobierno regional)
- [ANID - Start-Up Ciencia](#)
- [Free electrons](#)
- [Fundación Repsol](#)

3. Escalamiento, fabricación y comercialización de tecnologías

Estos mecanismos de financiamiento buscan apoyar la validación y escalamiento de productos tecnológicos comercializables en el mercado, impulsando el crecimiento de los ingresos empresariales y fomentando la rentabilidad y competitividad del sector productivo.

Principalmente aplican: Empresas

- Capital de riesgo (Venture Capital)
- Corporate Venture Capital (Ej. Manutara Ventures, ChileGlobal Ventures, Copec Wind Ventures)
- [Startup Chile Corfo](#)

4. Proyectos comerciales de escala industrial

Estos mecanismos de financiamiento están orientados al desarrollo y consolidación de proyectos de escala industrial, cuyo propósito es apoyar la construcción, implementación y operación de plantas o infraestructuras comerciales asociadas al hidrógeno verde y sus derivados. Estos instrumentos buscan viabilizar inversiones de alto impacto, facilitar el cierre financiero y acelerar la inserción de tecnologías en el mercado.

Principalmente aplican: Empresas

- [Red Eureka](#) (busca promover la cooperación internacional en proyectos de I+D entre empresas, universidades y centros tecnológicos de distintos países)
- Banca Comercial
- Créditos con garantía CORFO.
- Capital de riesgo extranjero (Ej: Breakthrough Energy Ventures)
- Proyectos de hidrógeno cofinanciados con compradores industriales (modelo financiamiento mixtos): Por ejemplo, la startup H2 Green Steel (Suecia) combinó venture debt, fondos públicos

nacionales, inversión de offtakers y coinversión de la UE para financiar una planta de acero verde. Otro ejemplo es Haru Oni de HIF Global quien cuenta con financiamiento de Porsche y fondos japoneses.

De este modo, los instrumentos de financiamiento identificados, tanto nacionales (ANID, CORFO, FIC) como internacionales (Horizon Europe, proyectos tipo Green Hysland, ARENHA o PROMETEO), se entienden como herramientas complementarias para dotar al país de una infraestructura basal robusta, distribuida territorialmente y orientada a: Sostener proyectos de I+D+i en toda la cadena de valor del hidrógeno verde y sus derivados.

Debido a la experiencia previa del consultor para utilizar mecanismos de financiamiento, es clave apoyar la creación y maduración de spin-offs y startups tecnológicas, que puedan apoyar con la creación de infraestructura basal y luego acceder a mecanismos de capital de riesgo, financiamiento comercial y conseguir formar capital humano técnico y profesional especializado.

Para la sustentabilidad financiera de la propuesta de red de colaboración, la demanda de hidrógeno será el desafío principal, no solo para el futuro de la red de colaboración sino también para la economía del hidrógeno, por lo que se entregan algunas de las recomendaciones para que el Estado incentive la demanda.

- Priorizar compra de hidrógeno renovable para compras públicas: El Estado puede impulsar la demanda mediante la compra de tecnologías limpias. Por ejemplo, buses a hidrógeno para RED Metropolitana o maquinaria para empresas públicas.
- Establecer mandatos de mezcla mínima de combustibles con hidrógeno renovable para hornos, calderas o grúas horquillas.
- Implementar Contratos por Diferencia (CfD) para reducir la brecha entre el costo de producción del hidrógeno verde y el precio que compradores están dispuestos a pagar.

Para concluir, el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde requiere una planificación estratégica del financiamiento según el perfil institucional, el objetivo del proyecto y su nivel de madurez. Chile cuenta con una oferta relevante de instrumentos públicos (CORFO, ANID, FIC), pero su efectividad depende de una correcta articulación actores privados y una demanda de hidrógeno sólida, asegurando un proyecto financieramente viable en el tiempo.

7 Propuesta de red de colaboración

- Para más información revisar el capítulo “12. Propuesta de red de colaboración” del informe completo.

El ecosistema nacional de investigación y desarrollo (I+D) asociado al hidrógeno verde enfrenta brechas importantes, particularmente la escasa disponibilidad de infraestructura especializada accesible para pruebas, validación tecnológica y formación técnica en hidrógeno verde. Tal como se ha levantado en el estudio, mediante entrevistas y encuestas universidades, centros de investigación y empresas emergentes deben invertir individualmente en equipamiento costoso o recurrir al extranjero para ensayos, lo que resulta ineficiente y retrasa la innovación.

En este contexto, se propone crear una Red Nacional de Colaboración que conecte centros de investigación y entrenamiento (públicos y privados) dedicados al hidrógeno verde y sus derivados. Esta red busca articular el uso eficiente del equipamiento científico, evitando duplicaciones y maximizando la utilización de equipos costosos, democratizando el acceso a capacidades técnicas de alto nivel en todo el país. La iniciativa alinearán los esfuerzos de I+D con la estrategia nacional de hidrógeno, potenciando la innovación colaborativa y el desarrollo de capital humano especializado

7.1 Objetivos de la Red Nacional de Colaboración:

1. **Uso eficiente del equipamiento científico y tecnológico:** Promover el uso eficiente y coordinado de laboratorios, plantas piloto y bancos de prueba mediante un sistema de acceso compartido entre instituciones públicas y privadas, garantizando el aprovechamiento pleno de equipamientos de alto costo y reduciendo la duplicación de inversiones. Este enfoque busca maximizar la rentabilidad social y técnica de la infraestructura existente, en línea con los modelos internacionales de redes de investigación interoperables [9] [10].
2. **Integración colaborativa multisectorial:** Consolidar un ecosistema de cooperación que vincule instituciones de investigación, centros tecnológicos, empresas y startups en torno a la validación de tecnologías, la estandarización de ensayos y el desarrollo conjunto de soluciones innovadoras. Este espacio de articulación fomentará la transferencia tecnológica y el aprendizaje colectivo, replicando los principios de colaboración de los sistemas de innovación basados en la triple y cuádruple hélice [10], [11].
3. **Desarrollo de capital humano especializado:** Fortalecer las competencias nacionales mediante programas de formación y entrenamiento práctico en operación, mantenimiento y seguridad de sistemas de hidrógeno. Estas actividades se realizarán en infraestructuras compartidas y bajo condiciones reales de operación, contribuyendo a la formación de personal altamente calificado que responda a las necesidades emergentes de la industria energética [10].
4. **Impacto territorial equilibrado:** Distribuir las capacidades científicas y tecnológicas en distintas regiones del país, considerando sus vocaciones productivas y potencial energético, con el fin de consolidar polos de innovación regionales. Este enfoque busca reducir la concentración de infraestructura en la capital, impulsando un desarrollo armónico, resiliente y sostenible de la industria del hidrógeno [10], [12].
5. **Sostenibilidad institucional:** Implementar un modelo de gestión autosostenible que combine inversión pública inicial con generación de ingresos propios mediante servicios técnicos, membresías y proyectos colaborativos. Este modelo busca garantizar la continuidad de la red

en el largo plazo, bajo principios de eficiencia, transparencia y corresponsabilidad entre los actores participantes [9], [10].

7.2 Participantes y alcance

La red estará compuesta por centros de I+D+i y de formación del ámbito público y privado que trabajan en hidrógeno verde o áreas afines en todo el país. Entre los participantes potenciales se incluyen:

- **Instituciones de educación superior e investigación:** Organizaciones dedicadas a la generación de conocimiento científico y tecnológico, con capacidades en ingeniería, energía, química, física, materiales y ciencias sociales. Se priorizará la colaboración interdisciplinaria, fomentando la investigación aplicada, la modelación de procesos y el desarrollo de soluciones tecnológicas orientadas a la transición energética y la sostenibilidad.
- **Centros tecnológicos y de validación experimental:** Infraestructuras orientadas a la demostración, ensayo y escalamiento de tecnologías, que actúan como espacios de vinculación entre la investigación y la industria. Estos centros aportan equipamiento especializado, procedimientos de certificación y capacidades de transferencia tecnológica, habilitando proyectos piloto y la validación de soluciones bajo condiciones controladas y seguras.
- **Centros de formación técnica y profesional:** Entidades responsables de la capacitación de técnicos y operarios en materias de operación, mantenimiento y seguridad de sistemas basados en hidrógeno. Su rol es fundamental para garantizar la disponibilidad de personal calificado y la estandarización de competencias laborales en el sector energético.
- **Instituciones privadas y empresas:** Actores industriales, energéticos y tecnológicos interesados en el desarrollo o uso de aplicaciones basadas en hidrógeno. Su participación facilita la transferencia tecnológica, la aplicación de conocimientos en entornos reales y la cofinanciación de proyectos conjuntos que aceleren la madurez tecnológica y la adopción de nuevas soluciones.
- **Plataformas territoriales y redes locales de innovación:** Espacios de articulación que facilitan la conexión entre actores públicos, privados y académicos en distintas regiones. Su participación permitirá adaptar las iniciativas de investigación y desarrollo a las realidades locales, fortalecer las cadenas de valor regionales y promover la creación de polos tecnológicos descentralizados.

Las empresas adquieren un rol protagónico dentro de la red, al participar activamente en proyectos de investigación aplicada, validación tecnológica y formación técnica junto a universidades y centros tecnológicos. Su aporte en financiamiento, equipamiento y conocimiento especializado fortalece la transferencia tecnológica y acelera la adopción industrial de nuevas soluciones. Además, la red contempla su incorporación mediante contratos y membresías, integrándolas en un modelo mixto de sostenibilidad que combina recursos públicos, privados y generación de ingresos propios. Este enfoque consolida a las empresas como socios estratégicos para impulsar la innovación, la eficiencia y la madurez tecnológica del ecosistema nacional de hidrógeno verde.

Se propone una red abierta y colaborativa, cualquier institución que cumpla criterios técnicos y de seguridad podrá adherir, sumando sus capacidades a un ecosistema nacional integrado. Esto permitirá cubrir toda la cadena de valor del H₂ verde y sus derivados, desde producción,

acondicionamiento y almacenamiento hasta uso final y seguridad, aprovechando fortalezas distribuidas entre distintas instituciones.

7.3 Gobernanza y Sistema de Adhesión

La red nacional de colaboración en I+D+i se sustentará en una estructura de gobernanza clara, descentralizada y participativa, que asegure una gestión basada en evidencia, coordinación eficiente y sostenibilidad institucional. Su dirección estará a cargo de un consejo integrado por representantes de los sectores científico, tecnológico, productivo y gubernamental, apoyado por una gerencia técnica responsable de la ejecución operativa y la coordinación de proyectos. Una entidad nacional actuará como secretariado técnico, con carácter independiente y multisectorial, encargada de definir normas, estándares y protocolos de interoperabilidad bajo principios de transparencia y neutralidad técnica. La incorporación de instituciones se realizará mediante un sistema de adhesión formal sustentado en compromisos técnicos y de colaboración, con modalidades de membresía adaptadas a las capacidades y naturaleza de cada actor, promoviendo la participación público-privada y la sostenibilidad financiera de la red. El proceso de adhesión será progresivo, iniciando con un grupo de miembros fundadores con capacidades demostradas, para luego ampliarse gradualmente mediante convocatorias que prioricen la descentralización territorial, la complementariedad técnica y la madurez operativa. Este modelo de expansión controlada busca garantizar la calidad técnica, la interoperabilidad y la estabilidad a largo plazo de la red nacional de colaboración.

Esta propuesta de red nacional de colaboración en I+D+i representa un desafío de gran magnitud que requerirá un alto nivel de coordinación, compromiso institucional y madurez técnica entre los actores participantes. Si bien esta propuesta establece los lineamientos para un modelo de gobernanza y adhesión sólido, su ejecución demandará superar barreras administrativas, técnicas y culturales, así como asegurar la alineación de prioridades entre sectores públicos, académicos y productivos. La construcción de confianza, la estandarización de procesos y la sostenibilidad financiera a largo plazo serán factores críticos para transformar esta propuesta en una red operativa y efectiva, capaz de articular los esfuerzos nacionales en torno al desarrollo tecnológico y la innovación en hidrógeno verde.

7.4 Sostenibilidad y Modelo de Negocio

La sostenibilidad de la red se entiende en dimensiones económica, institucional y técnica, articulando gobernanza, gestión operativa y diversificación financiera para asegurar continuidad, eficiencia, interoperabilidad y generación de valor más allá de los ciclos de financiamiento iniciales, en línea con recomendaciones internacionales.

- **Inversión inicial y financiamiento semilla:** Se requiere inversión de habilitación para infraestructura compartida, capacidades técnicas y plataforma digital, cubriendo instalación, personal especializado y mantenimiento preventivo. La inversión semilla pública puede catalizar capital privado bajo esquemas de riesgo compartido. Las guías internacionales recomiendan fondos por al menos cinco años, incluyendo equipamiento, sistemas digitales y dotación técnica; las plataformas digitales exigen financiamiento continuo para asegurar estandarización e interoperabilidad.
- **Modelo de negocio mixto y diversificación de ingresos:** Se combina financiamiento público nacional e internacional, aportes privados y generación propia de ingresos. La participación

privada complementa recursos e introduce incentivos de eficiencia, innovación y control de costos, especialmente pertinente en infraestructuras tecnológicas donde la industria aporta equipamiento, personal o capital a cambio de acceso a resultados.

- **Ingresos operacionales:** Los ingresos propios provienen del uso compartido de infraestructura, servicios técnicos, membresías, licencias digitales colectivas y proyectos colaborativos de I+D, fortaleciendo disponibilidad, actualización y calidad, y reduciendo dependencia de subsidios.
- **Arriendo de espacios:** El cobro por uso de laboratorios, plantas piloto y bancos de prueba complementa fondos públicos y privados, cubre costos variables y de mantenimiento, y aporta estabilidad financiera. Las tarifas de acceso, diferenciadas por tipo de usuario, deben integrarse al plan financiero y destinarse a operación y actualización, promoviendo coparticipación económica y uso eficiente de recursos.
- **Servicios técnicos y de apoyo:** Se ofrecen análisis y ensayos bajo protocolos estandarizados, asistencia técnica para experimentación, certificación y aseguramiento de calidad, y capacitación en operación segura y mantenimiento. Los servicios se rigen por tarifas según complejidad y dedicación, con mecanismos de acceso preferente y compensaciones en especie.
- **Membresías institucionales:** El sistema de membresías anuales, escalonado y proporcional al tipo y tamaño de institución y nivel de uso, asegura flujo financiero estable y acceso preferente a infraestructura, servicios y gobernanza. Se contemplan aportes monetarios y en especie, con revisión periódica de condiciones.
- **Licencias y herramientas digitales compartidas:** La gestión consorciada de software científico reduce costos, mejora interoperabilidad y habilita acceso equitativo. Las licencias colectivas se financian de forma cooperativa, se consideran costos operacionales elegibles y pueden generar ingresos recurrentes para actualización, soporte y gestión digital.
- **Proyectos de I+D colaborativos:** Se promueven proyectos aplicados y de validación tecnológica mediante fondos competitivos y cooperación internacional, contratos y servicios tecnológicos con empresas, y gestión de resultados y propiedad intelectual, contribuyendo a sostenibilidad, capacidades y transferencia. El conjunto de mecanismos configura un esquema integral que favorece autosuficiencia, reinversión y cooperación interinstitucional, alineado con estándares internacionales y objetivos de transición energética.

Si bien existen referentes internacionales exitosos en la implementación de redes e infraestructuras colaborativas de investigación, su adaptación al contexto nacional representa uno de los mayores desafíos para garantizar que esta red de infraestructura compartida logre consolidarse y mantenerse operativa en el tiempo. La sostenibilidad de su funcionamiento dependerá de la capacidad de articular eficazmente a los distintos actores, equilibrar la corresponsabilidad financiera y técnica, y desarrollar mecanismos de gestión que permitan su autonomía progresiva, evitando la dependencia permanente de recursos externos para sus actividades cotidianas.

7.5 Despliegue gradual al 2030

El despliegue de la red será escalonado, iniciando formalmente en 2030 con una base sólida y evaluando anualmente las finanzas y trayectoria tecnológica. A continuación, se describe el plan propuesto por fases:

1. **Fase de Diseño y Piloto (2025-2027):** Durante los próximos años se propone llevar a cabo las actividades preparatorias. Esto incluye la formulación detallada del proyecto de red, asegurando financiamiento inicial (fondos CORFO, cooperación internacional como GIZ/Team Europe, etc.), y estableciendo la gobernanza (instalación del consejo y secretariado). Se identificarán 5 a 7 centros piloto fundadores en distintas regiones y se firmarán convenios de adhesión con ellos, asegurando al menos uno por cada región estratégica de hidrógeno. En esta fase se desarrollará la plataforma de reservas y se elaborarán manuales de operación y seguridad compartidos. A finales de 2027 se propone ejecutar un piloto de la red: por ejemplo, un proyecto colaborativo donde un equipo de Valparaíso use equipamiento en Antofagasta vía la plataforma, evaluando la logística, costos y protocolos en la práctica. Los resultados del piloto servirán para refinar el modelo de negocios y arreglos operativos.
2. **Fase de Lanzamiento Oficial (2030):** Con lecciones aprendidas del piloto, en 2030 se realizará el lanzamiento oficial de la Red Nacional de Hidrógeno Verde. En este hito se incorporarán formalmente los centros fundadores y se inaugurarán las instalaciones clave (laboratorios modulares, plantas piloto regionales, etc.) para servicio compartido. Esta etapa inicial contará con, por ejemplo, 7 a 10 instituciones miembro distribuidas en varias regiones, cubriendo diferentes ámbitos (producción, uso, seguridad). Se pondrá en marcha el sistema de membresías anual y la plataforma en línea para reservas comenzará a operar de cara a los investigadores y desarrolladores. También se impartirá la primera ronda de programas de capacitación nacional usando la infraestructura de la red. Durante este lanzamiento controlado, se monitoreará de cerca el desempeño para asegurar que la seguridad y coordinación funcionen como esperado, ajustando cualquier procedimiento si es necesario (minimizando riesgos en la etapa temprana).
3. **Fase de Expansión (2031-2035):** Tras el arranque, la red entrará en una etapa de crecimiento progresivo. Cada año se abrirán nuevas convocatorias para sumar centros de I+D y entrenamiento adicionales. Por ejemplo, en 2031 podrían adherir más universidades regionales (del norte y sur), en 2032 se incorporan centros tecnológicos privados o internacionales interesados, y así sucesivamente. Se espera que para 2035 la red cuente con representación en todas las macrozonas del país, integrando del orden de 20 a 30 instituciones miembros. Paralelamente, se invertirá en actualización de equipamiento y ampliación de laboratorios según la demanda detectada (añadiendo nuevos módulos de prueba, mejores instrumentos, etc.). La red buscará activamente financiamiento competitivo (fondos I+D nacionales, Horizon Europe, bancos de desarrollo) para sostener esta expansión. Durante esta fase, se mantendrá una evaluación continua de riesgos y desempeño: solo se escalará al ritmo que la red pueda absorber sin comprometer la calidad del servicio ni la seguridad.

Cada fase estará orientada por el principio de despliegue responsable: avanzar paso a paso, evaluando resultados antes de escalar, involucrando a los actores claves en las decisiones y asegurando que los riesgos técnicos, financieros y de seguridad estén bajo control.

Para terminar, se espera que la “Red Nacional de Colaboración en Hidrógeno Verde y sus Derivados” permitirá a Chile escalar en el desarrollo de esta industria del hidrógeno. Al coordinar centros I+D, centros de formación, empresas y universidades bajo un objetivo común, que es optimizar el uso de los recursos disponibles y acelerar la generación de conocimiento y soluciones tecnológicas. Esta red nacional será un catalizador para que el país no solo produzca hidrógeno verde, sino que también desarrolle tecnología, conocimiento y capital humano propio en torno a este, convirtiendo al hidrógeno en un motor de desarrollo sostenible regional y nacional.

8 Conclusiones generales

El presente capítulo tiene como objetivo sintetizar los principales resultados y aprendizajes del estudio. Se presentan las conclusiones generales, los puntos críticos detectados y un conjunto de recomendaciones estratégicas orientadas a fortalecer las capacidades nacionales de investigación, innovación y formación en torno al hidrógeno verde.

8.1.1 Puntos críticos y conclusiones generales

El estudio evidencia que el desarrollo del hidrógeno verde en Chile depende directamente de la consolidación de un ecosistema robusto de investigación, desarrollo e innovación, acompañado por la formación de capital humano técnico y especializado. Si bien el país ha avanzado en la instalación de capacidades iniciales, aún existen limitaciones estructurales en materia de equipamiento, gobernanza y articulación interinstitucional.

8.1.2 Brechas críticas de equipamiento y capacidades

La infraestructura científica nacional vinculada al hidrógeno presenta un déficit considerable frente a los estándares internacionales. En la mayoría de las instituciones, los equipamientos son limitados, no interoperables o insuficientes para realizar validaciones tecnológicas.

En el corto plazo (hasta 2027), es importante priorizar la adquisición de electrolizadores y sistemas de acondicionamiento (compresores, secadores y almacenamiento) que permitan la producción experimental de hidrógeno verde, junto con instrumentación analítica básica para garantizar la trazabilidad, calidad de los resultados y análisis científicos.

En el mediano plazo (hasta 2030), es necesario incorporar reactores químicos para la producción de derivados y la incorporación de software especializado para simulación y modelado de procesos, habilitando la validación tecnológica avanzada.

En el largo plazo (2030 en adelante), el desafío principal será la descentralización de las capacidades mediante laboratorios modulares y parques de prueba semiindustriales, de modo que las regiones productivas puedan validar tecnologías y formar personal bajo condiciones reales de operación, tanto para los centros que realizan I+D+i, como para la propia industria.

8.1.3 Capital humano y gobernanza

Según el levantamiento realizado, se identificó que el país enfrenta una escasez estructural de personal técnico calificado en operación, mantenimiento y seguridad de sistemas de hidrógeno. La formación se concentra en niveles de posgrado e investigación académica, pero existe una ausencia de oferta sólida en la formación técnica superior aplicada. Este déficit genera una brecha operacional que ralentiza la puesta en marcha de proyectos y limita el desarrollo de capacidades locales, ligadas a la operación y uso de los distintos equipos asociados a la cadena de valor del hidrógeno verde y derivados.

En materia de gobernanza, se observó una baja articulación entre actores públicos, privados y académicos, sumada a la falta de una demanda sostenida de hidrógeno verde y de un marco normativo consolidado. Estos factores generan incertidumbre para la inversión y dificultan la planificación de largo plazo, afectando tanto el desarrollo de infraestructura como la investigación aplicada.

8.2 Proceso de levantamiento de información

El levantamiento de información se efectuó a través de una metodología mixta, integrando revisión documental, encuestas, entrevistas y visitas a terreno a instituciones nacionales e internacionales. Este proceso permitió identificar el Estado real de las capacidades en hidrógeno verde, validar las necesidades de equipamiento y establecer las prioridades de inversión.

Se identificó que la concentración territorial del equipamiento científico limita la descentralización de la I+D y el acceso a capacidades en regiones estratégicas. Asimismo, los talleres de validación permitieron consensuar una visión compartida sobre la necesidad de fortalecer la infraestructura, avanzar hacia modelos de financiamiento sostenibles y fomentar la cooperación entre instituciones.

8.3 La Red Nacional de Colaboración

Como respuesta estructural a las brechas detectadas, el estudio plantea la creación de una Red Nacional de Colaboración en I+D+i en Hidrógeno Verde y Derivados, orientada a optimizar el uso del equipamiento científico y tecnológico disponible en el país.

La propuesta busca articular los esfuerzos públicos y privados bajo un modelo de uso compartido de infraestructura, impulsando la cooperación intersectorial y la transferencia tecnológica. La red permitirá evitar duplicaciones de inversión, fortalecer la interoperabilidad y fomentar la formación de capital humano en entornos reales de operación.

El modelo de sostenibilidad se concibe como mixto, combinando inversión pública inicial con mecanismos de generación de ingresos propios mediante servicios técnicos, membresías, licencias colectivas y proyectos colaborativos. Su implementación se plantea de manera escalonada, comenzando con una fase piloto (2025-2027), seguida por una etapa de consolidación (2030) y una de expansión (2031-2035), hasta alcanzar representación territorial en todas las macrozonas estratégicas del país.

La ejecución de esta red requerirá un alto grado de coordinación y compromiso entre los actores participantes. Si bien existen experiencias internacionales exitosas, su adaptación al contexto nacional constituye uno de los desafíos más complejos. La sostenibilidad de la red dependerá de la capacidad de establecer mecanismos de gobernanza efectivos, equilibrar los aportes públicos y privados, y reducir la dependencia de capital externo, garantizando continuidad operativa y autonomía a largo plazo.

8.4 Desafíos Estructurales

Los desafíos identificados durante el estudio se agrupan en cinco ejes principales:

- **Capital humano:** Déficit de técnicos con competencias transversales en alta presión, sistemas eléctricos y seguridad de hidrógeno.
- **Cadena de suministro:** Dependencia de proveedores internacionales, altos costos logísticos y ausencia de soporte técnico local.
- **Regulación:** Falta de estándares y marcos normativos actualizados, lo que limita la certificación y operación de equipos.

- **Articulación productiva:** Escasa vinculación entre investigación académica e industria, con baja transferencia tecnológica.
- **Financiamiento e inversión sostenida:** Si bien existen algunos instrumentos públicos orientados al apoyo de largo plazo, el desarrollo de proyectos de investigación y desarrollo sigue dependiendo en gran medida de fondos concursables de duración acotada, lo que limita la continuidad y la planificación estratégica de iniciativas de mayor envergadura.

8.5 Recomendaciones estratégicas

Las recomendaciones se estructuran en tres niveles complementarios: inversión y equipamiento, desarrollo de capital humano y fortalecimiento de la investigación aplicada.

Inversión y equipamiento

- Priorizar la adquisición de instrumentación analítica avanzada para asegurar validaciones de pureza y desempeño bajo estándares internacionales.
- Desarrollar centros de certificación nacional que permitan homologar equipos y procesos, cerrando el ciclo experimental dentro del país.
- Fomentar acuerdos con fabricantes internacionales para transferencia de tecnología, soporte técnico local y capacitación de personal en mantenimiento especializado.

Capital humano y formación

- Diseñar programas formativos que integren competencias transversales en sistemas eléctricos, mecánicos y de seguridad industrial.
- Incorporar contenidos de gobernanza, normativas y sostenibilidad en la formación técnica y profesional.
- Promover alianzas universidad-industria para prácticas y validaciones en terreno, fortaleciendo la formación aplicada y la experiencia práctica.

Investigación aplicada y gobernanza

- Potenciar la propiedad intelectual y la transferencia tecnológica en los proyectos de I+D+i, generando incentivos para la innovación aplicada.
- Realizar estudios de viabilidad territorial y de demanda energética que orienten las inversiones hacia zonas con mayor potencial productivo.
- Implementar instrumentos financieros, como incentivos tributarios o contratos por diferencia (CfD), reduciendo las brechas de costos entre el hidrógeno verde y los combustibles fósiles, generando así oportunidades para inversión.
- Fortalecer la demanda de servicios de la Red Nacional de Colaboración, impulsando la contratación de ensayos, certificaciones y asistencia técnica por parte del Estado, la industria y la academia. Esto permitirá generar un flujo sostenido de operaciones que respalde la viabilidad económica de la red y fomente la adopción tecnológica a nivel nacional.

8.6 Conclusiones asociadas a los objetivos específicos

1. **Análisis internacional:** Se constató que los centros internacionales de referencia cuentan con esquemas consolidados de sostenibilidad, gobernanza técnica y financiamiento mixto, los cuales pueden servir como modelo adaptativo para Chile.
2. **Catastro nacional:** Se evidenció una infraestructura fragmentada, concentrada territorialmente y con escaso acceso a equipamiento analítico, lo que justifica la necesidad de coordinación nacional.
3. **Identificación de necesidades:** Se determinó que la brecha más crítica radica en la falta de equipamiento para producción experimental y análisis de gases, junto con la carencia de infraestructura formativa aplicada. Esta limitación reduce la capacidad de ofrecer servicios de I+D+i y, por tanto, de generar una demanda suficiente que impulse el desarrollo tecnológico.
4. **Tipologías propuestas:** Se definieron categorías de equipamiento representativas para distintas etapas de la cadena de valor del hidrógeno verde, priorizando aquellas con alto potencial de transferencia tecnológica.
5. **Estimación de costos:** Se desarrollaron rangos referenciales de inversión, operación y mantenimiento que permiten planificar la sostenibilidad económica y orientar futuras inversiones.
6. **Planes de sostenibilidad:** Se establecieron lineamientos para desarrollar un modelo de negocio mixto, basado en corresponsabilidad pública y privada, orientado a que la red aumente gradualmente su capacidad de financiar sus propias operaciones. Este enfoque de autonomía progresiva busca que, con el tiempo, la red dependa menos del financiamiento estatal y sostenga una mayor proporción de sus costos mediante la prestación de servicios especializados.
7. **Material gráfico, validación y difusión:** Se generaron productos de comunicación técnica y actividades de validación participativa que fortalecieron la apropiación de los resultados por parte de los actores del ecosistema.

8.7 Consideraciones Finales

El desarrollo del hidrógeno verde en Chile exige una estrategia integrada que combine infraestructura científica, gobernanza articulada y formación de capital humano. La propuesta de una Red Nacional de Colaboración establece una hoja de ruta factible para avanzar hacia ese objetivo, pero su implementación requerirá un compromiso sostenido y una coordinación efectiva entre los distintos niveles institucionales.

El desafío es doble, consolidar una base técnica que permita competir en el escenario internacional y, al mismo tiempo, asegurar que el conocimiento y la infraestructura se traduzcan en beneficios territoriales y productivos concretos.

Los resultados del estudio indican que la creación de una Red Nacional de Colaboración constituye una hoja de ruta factible para orientar el futuro de las actividades de investigación, desarrollo e innovación en torno al hidrógeno verde. Su puesta en marcha, sin embargo, requerirá un compromiso sostenido y una coordinación efectiva entre los distintos niveles institucionales para materializar el potencial identificado.

9 Bibliografía

- [1] Ministerio de Hacienda, «Anteproyecto de la Estrategia Financiera frente al Cambio Climático,» 2024. [En línea]. Available: <https://participacionciudadana.hacienda.cl/consultas-ciudadanas/participa-en-la-consulta-ciudadana-de-la-actualizacion-de-la-estrategia/anteproyecto>.
- [2] H. C. a. M. & Company, «Hydrogen Insights 2023,» 2023. [En línea]. Available: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2023/05/Hydrogen-Insights-2023.pdf>.
- [3] E. Commission, «A Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe,» 2020. [En línea]. Available: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-07/hydrogen_strategy_0.pdf.
- [4] U. D. o. Energy, «Regional Clean Hydrogen Hubs,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.energy.gov/oced/regional-clean-hydrogen-hubs-0>.
- [5] I. R. E. A. (IRENA), «Hydrogen: A Renewable Energy Perspective,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.irena.org/publications/2019/Sep/Hydrogen-A-renewable-energy-perspective>.
- [6] I. E. A. (IEA), «Hydrogen Projects Database,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-projects-database>.
- [7] M. d. E. d. Chile, «Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde,» 2020. [En línea]. Available: https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf.
- [8] M. d. E. d. Chile, «Plan de Acción de Hidrógeno Verde 2023-2030,» 2023. [En línea]. Available: https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/plan_de_accion_hidrogeno_verde_2023-2030.pdf.
- [9] Ministerio de Hacienda de Chile, «Anteproyecto de la Estrategia Financiera frente al Cambio Climático,» 2024.
- [10] Indecon International Economic Consultants, «National Research Infrastructure Evaluation - Science Foundation Ireland (SFI),» 2022. [En línea]. Available: <https://www.sfi.ie/research-news/publications/SFI-Research-Infrastructure-Indecon-Report-Final-Version-22.pdf>.
- [11] ENHANCE Consortium, «Recommendations on Sharing Research Infrastructure Resources,» 2023. [En línea]. Available: https://enhanceuniversity.eu/wp-content/uploads/2024/12/ENHANCERIA_D6.3-Recommendations-on-sharing-RI-resources-within-ENHANCE.pdf.
- [12] Interreg Europe, «Policy Brief: Clusters – Driving the Green and Digital Twin Transitions,» 2021. [En línea]. Available: https://www.clustercollaboration.eu/sites/default/files/document-store/Policy_Brief_-_Clusters.pdf.
- [13] European Commission, Brussels, Belgium, «European Cluster Collaboration Platform (ECCP), "ECCP Factsheet",» 2021. [En línea]. Available: https://www.clustercollaboration.eu/sites/default/files/2023-04/ECCPfactsheet_Korea_2022.pdf.
- [14] I. E. A. (IEA), «Global Hydrogen Review 2023,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>.
- [15] Clean Hydrogen Partnership, «Clean Hydrogen JOINT UNDERTAKING,» 2025. [En línea]. Available: https://www.clean-hydrogen.europa.eu/document/download/e5846471-328c-48fd-b91f-837da07556b6_en?filename=Clean%20Hydrogen%20JU%20AWP%202025_FINAL_ADOPTED.pdf.
- [16] J. C. Prof. Dr. Ad van Wijk, «Green Hydrogen for a European Green Deal a 2x40GW Initiative,» 2021. [En línea]. Available: https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2021/11/Hydrogen-Europe_2x40-GW-Green-H2-Initiative-Paper.pdf.
- [17] «TeachHy 2020 Project,» 2020. [En línea]. Available: <http://www.teachy.eu/>.
- [18] U.S. Department of Energy - Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, «Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office Multi-Year Program Plan,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-05/hfto-mypp-2024.pdf>.
- [19] U.S. Department of Energy - Office of Clean Energy Demonstrations, «Seven Regional Clean Hydrogen Hubs will Create Thousands of High-Quality Jobs, Strengthen the Nation's Energy Security, and Combat the Climate Crisis,» Octubre 2023. [En línea]. Available: https://content.govdelivery.com/accounts/USDOEOCED/bulletins/37599bb?utm_source=chatgpt.com.

- [20] A. S. E. K. J. E. (J. Lina Li, «Hydrogen Factsheet - China,» Abril 2022. [En línea]. Available: <https://adelphi.de/system/files/mediathek/bilder/H2%20Factsheet%20China.pdf>.
- [21] U.S. Department of Energy - Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, «H2EDGE: Hydrogen Education for a Decarbonized Economy Initiative,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-05/h2iqhour-04252024.pdf>.
- [22] International Energy Agency (IEA), «US hydrogen workforce development programmes,» Mayo 2024. [En línea]. Available: <https://www.iea.org/policies/17838-us-hydrogen-workforce-development-programmes>.
- [23] TRACTEBEL, «Oportunidades para el desarrollo de una industria de hidrógeno solar en las regiones de Antofagasta y Atacama: Innovación para un sistema energético 100% renovable,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.corfo.cl/sites/Satellite?blobcol=urldata&blobkey=id&blobtable=MungoBlobs&blobwhere=1475167933511&ssbinary=true>.
- [24] UNIDAD GESTIÓN DE INFORMACIÓN DIVISIÓN ENERGÍAS SOSTENIBLES, «Identificación de Potenciales Renovables: Caso Eólico,» 2021. [En línea]. Available: https://exploradores.minenergia.cl/portal-ernc/websites/Magallanes_White_Paper_Edicion_Feb20.pdf?utm_source=chatgpt.com.
- [25] Department of Energy of United States, «Hydrogen Shot,» 2021. [En línea]. Available: https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-and-fuel-cell-technologies-office?nrg_redirect=270099. [Último acceso: 2025].
- [26] A. B. A. e. al, «Techno-economic optimisation modelling of a solar-powered hydrogen production system for green hydrogen generation,» 2023. [En línea]. Available: https://sustainenergyres.springeropen.com/articles/10.1186/s40807-025-00151-5?utm_source=chatgpt.com.
- [27] Hydrogen Council, «Hydrogen Insights,» Diciembre 2023. [En línea]. Available: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2023/12/Hydrogen-Insights-Dec-2023-Update.pdf>.
- [28] massachusetts institute of technology, «Advances in Power-to-Gas Technologies: Cost and Conversion Efficiency,» [En línea]. Available: <https://ceepr.mit.edu/wp-content/uploads/2023/04/MIT-CEEPR-WP-2023-09.pdf>.